



**Universidade de
Aveiro
2008**

Departamento de Geociências

**Mauro Jorge Pereira
de Oliveira**

**Rede de monitorização da contaminação por Nitratos em
aquíferos no Parque de Doñana.**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Doutor Marques da Silva, Professor do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro e co-orientada pela Doutora Marisol Manzano, Professora da Universidade Politécnica de Cartagena.

o júri

presidente

Eduardo Anselmo Ferreira da Silva
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Manuel Augusto Marques da Silva
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

José Manuel Martins Azevedo
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra

agradecimentos

Na realização deste trabalho manifesto o meu profundo agradecimento a várias pessoas que contribuíram, de uma maneira ou de outra, para a sua realização:

- À Professora Marisol Manzano, professora da Universidade Politécnica de Cartagena, que propôs este projecto, cuja colaboração, apoio e coordenação foram determinantes na realização deste trabalho.

- Ao Professor Marques da Silva, professor da Universidade de Aveiro, que aceitou coordenar este projecto, sempre prestável, cujo conhecimento e apoio foram uma mais valia para a conclusão deste trabalho.

- Ao Horácio Higuera, bolsista da UPCT, pela sua disponibilidade e ajuda prestada.

- Ao Departamento de Geociências, e às pessoas que aí trabalham, pela paciência e disponibilidade.

- A todos os professores do Departamento de Geociências, que me acompanharam ao longo do meu percurso académico e contribuíram para a minha formação académica.

- À Universidade de Aveiro, instituição que me recebeu.

- À minha família, pelo apoio incondicional prestado.

- Aos meus amigos, pela força e alegrias partilhadas.

- Aos meus colegas de curso, pela boa camaradagem e ajuda prestada ao longo do meu percurso académico.

A todos muito obrigado.

palavras-chave

Águas subterrâneas; Directiva Quadro das Águas; Contaminação agrícola; Redes de monitorização; Doñana (Espanha).

resumo

O Parque Nacional de Doñana representa um espaço natural único em toda a Europa, devido às suas dimensões e localização geográfica, perto dos ambientes bioclimáticos africanos, albergando uma biodiversidade única. Porém, alguns dos seus valores naturais encontram-se em risco como consequência de certas actividades, nomeadamente a agricultura.

Com a implementação da normativa europeia Quadro da Água (Directiva 2000/60/CE de 12 de Outubro de 2000), foram estabelecidas metas e normas com o intuito “conservar e melhorar o ambiente aquático na Comunidade”. Este objectivo diz respeito, antes de mais, à qualidade das águas de superfície e subterrâneas e dos ecossistemas terrestres associados a essas massas de águas.

Os países da UE vêm-se, por isso, obrigados a respeitar as regras e normas impostas para poderem conservar os estatutos de qualificação dos seus ecossistemas associados a massas de águas. Portanto, ao abrigo da normativa Quadro da Água têm-se realizado inúmeros projectos, num dos quais está inserido este trabalho.

O objectivo principal foi estabelecer uma rede de monitorização para o controlo da contaminação agrícola por Nitratos num sector do aquífero de Doñana junto ao Parque Nacional. Uma vez que já eram conhecidas as principais causas que colocam em risco a área envolvente do Parque Nacional de Doñana, determinou-se a extensão espacial da contaminação agrícola no aquífero. Isto foi estabelecido recorrendo aos dados químicos históricos de sondagens já existentes na zona. Mediante os resultados obtidos, é proposta a colocação de novas sondagens em pontos estratégicos, de forma a poder-se estabelecer uma rede de monitorização que incorpore as sondagens já existentes e cubra as zonas de risco potenciais ainda não monitorizadas.

keywords

Groundwater; Water Framework Directive; Agriculture contamination; Monitoring network; Doñana (Spain).

abstract

Doñana National Park represents a unique natural space in all Europe due to its dimensions and geographic location, near African bioclimatic environments, accommodating a unique biodiversity. However some of its natural values are at risk due to the activities that act in the surroundings specially the agriculture.

With the implementation of the European Water Framework Directive (Directive 2000/60/CE in 12 of October of 2000) that was created to establish goals and standards with the purpose of "conservation and improvement the aquatic environment in the community". This objective responds, first of all, to the quality of the surface waters and groundwaters and terrestrial ecosystems associated with these waters.

So the EU country's see themselves forced, to respect the rules and standards imposed in order to maintain the conservation status of their ecosystems associated to the waters. Thenceforth, under protection of the European Water Framework Directive many projects had been developed, in which is inserted this work.

The main goal was to establish a monitoring network to the agriculture contamination by Nitrates in one sector of Doñana's aquifer join to the National Park. Once that was already known the major causes that put at risk the surrounding areas of the National Park of Doñana, were determined the spatial extension of the agriculture contamination in the aquifer. This was established draw on the chemical data available of the already existing drills in the area. Based on the obtained results, its made a proposition for built new drills in strategic points, in order to establish a monitoring network that includes the existing drills and covers the potential risk areas not monitored.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJECTIVOS.....	7
3.	GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DA ZONA.....	11
3.1	GEOLOGIA.....	13
3.2	TECTÓNICA.....	14
3.3	HIDROGEOLOGIA.....	15
3.4	HIDRODINÂMICA.....	18
4.	METODOLOGIA DE TRABALHO E MATERIAIS APLICADOS.....	23
4.1	MATERIAIS.....	25
4.2	METODOLOGIA USADA.....	28
5.	ESTUDO HIDROQUÍMICO GERAL.....	29
6.	ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO AGRÍCOLA.....	35
6.1	FONTES DE NO_3^- NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA ZONA DE ESTUDO.....	37
6.2	SITUAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR NO_3^- EM 1999.....	41
6.3	ESTUDO DA EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA CONTAMINAÇÃO POR NO_3^- ENTRE 1991 E 2007.....	43
6.3.1	EVOLUÇÃO TEMPORAL EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE NO_3^- E SO_4^{2-} NAS SONDAGENS ESTUDADAS.....	44
6.3.2	EVOLUÇÃO TEMPORAL DE NO_3^- NAS SONDAGENS ESTUDADAS.....	49
6.3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE NO_3^- A DIFERENTES PROFUNDIDADES.....	53
7.	DESENHO DE UMA REDE DE OBSERVAÇÃO E CONTROLO DA CONTAMINAÇÃO AGRÍCOLA.....	57
7.1	GENERALIDADES.....	59
7.2	DIMENSIONAMENTO DE UMA SONDAGEM.....	59
7.3	TIPOS DE FUROS DE MONITORIZAÇÃO.....	66
7.4	MÉTODOS DE PERFURAÇÃO.....	67
7.5	DESENHO DA REDE DE MONITORIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO AGRÍCOLA EM DOÑANA.....	71
8.	CONCLUSÕES.....	75
9.	BIBLIOGRAFIA & WEBGRAFIA.....	79

ANEXOS

ANEXO I: RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DE CADA SONDAGEM E HISTÓRICO DE DADOS

ANEXO II: EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE NO_3^- E SO_4^{2-} EM TODOS OS PONTOS ESTUDADOS

ANEXO III: MAPAS DE NITRATOS EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Espaços naturais protegidos na Comarca de Doñana e respectiva qualificação, povoações e rede fluvial. Fonte: Custodio et al. (2007). Não se inclui a franja situada a Norte de Sanlúcar de Barrameda, “La Algaida”.

Figura 1.2. Usos gerais do solo na Comarca de Doñana e envolvente. Fonte: modificado de UPC (1999).

Figura 2.1. Esquema construtivo da perfuração desenhada para controlar a evolução dos nitratos em profundidade. Fonte: Iglesias (1999).

Figura 3.1. A) Mapa geológico de Doñana e Localização da zona de estudo. B) Corte geológico representativo da zona de estudo. C) Corte geológico actualizado da zona de estudo. Fonte: Manzano et al. (2007).

Figura 3.2. Tectónica e morfologia da zona costeira. Fonte: Flores (1994).

Figura 3.3. a) Representação da piezometria regional actual; b) Principais zonas de bombagem. Fonte: Manzano et al. (2007).

Fig. 3.4 Mapa de situação dos pontos piezométricos e distribuição das subzonas. Fonte: Lozano (2004).

Figura 4.1. a) Obtenção de amostras de água numa sondagem manual; b) medição de parâmetros químicos no campo (pH, condutividade eléctrica, temperatura).

Figura 4.2. a) Exemplo de sondagens da série SGOP e C (vários piezómetros a diferentes profundidades); b) medição do nível piezométrico.

Figura 4.4. Construção das sondagens manuais da série UPCT. a) Perfuração; b) aspecto da tubagem; c) cravamento da tubagem.

Figura 5.1. Águas subterrâneas representativas da área estudada. Os círculos discriminam as águas de tipo Na-Cl que são doces ($\leq 1 \text{ mS cm}^{-1}$) das que são salinas ($> 1 \text{ mS cm}^{-1}$). Fonte: Manzano et al. (2005).

Figura 5.2. Esquema geológico que mostra as duas unidades hidrogeológicas, Superior e Inferior. Fonte: Lozano (2004).

Figura 5.3. Principais características químicas das águas da Unidade Superior e da Unidade Inferior. Fonte: Manzano et al. (2005).

Figura 6.2. Secção idealizada e simplificada da envolvente do ribeiro de La Rocina na qual se mostram e comparam as condições hidráulicas no estado natural (A) e no estado influenciado devido ao efeito das extracções de água subterrânea por bombagem (B) . Fonte: Custodio (1994).

Figura 6.3. Perfis de concentrações de nitratos e humidade na zona não saturada. Fonte: Iglesias (1999).

Figura 6.4. Perfis de concentrações de nitratos nas águas subterrâneas amostradas na sondagem multitubo da propriedade El Tejar. Fonte: Manzano (comunicação pessoal).

Figura 6.5. Localização das sondagens estudadas das quais se dispõe de informação química histórica. Os dados de profundidade total e localização do tubo ralo de cada sondagem em particular encontram-se no Anexo 1.

Figura 6.6. a) Evolução temporal em função da profundidade de NO_3^- nas sondagens estudadas entre 1991 e 1997. b) Evolução temporal em função da profundidade de NO_3^- nas sondagens estudadas entre 1998 e 2007.

Figura 6.7. a) Evolução temporal em função da profundidade de SO_4^{2-} nas sondagens estudadas entre 1991 e 1997. b) Evolução temporal em função da profundidade de SO_4^{2-} nas sondagens estudadas entre 1998 e 2007.

Figura 6.8. Alguns exemplos da evolução temporal de NO_3^- e SO_4^{2-} comentados no texto.

Figura 6.9. a) Distribuição e estatística dos dados no período 1991-1997 em função da profundidade; b) Distribuição e estatística dos dados no período 1998-2007 em função da profundidade.

Figura 7.1. Proposta de localização para os novos conjuntos de sondagens.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 6.1 Efeitos das actividades agrícolas sobre a qualidade da água. Fonte: Javier Bayo (Comentário pessoal: apontamentos Impacto Ambiental, UPCT.)

Tabela 6.2. Quantificação do azoto aplicado. Fonte: Iglesias (1999).

Tabela 6.3. Resumo das tendências de evolução temporal de cada sondagem.

Tabela 6.4. Resumo dos parâmetros estatísticos analisados

Tabela 7.1. Vantagens e desvantagens dos diferentes materiais de revestimento da sondagem. Fonte: Instituto Geológico y Minero de España (aguas.igme.es)

Tabela 7.2. Materiais mais aplicados na zona filtrante. Fonte: Universidad Jaume I de Castellón (www.agua.uji.es)

Tabela 7.3. Tipos de ralo. Fonte: Universidad Jaume I de Castellón (www.agua.uji.es)

ÍNDICE DE IMAGENS

Imagem 1. Panorâmica da marinha desde Canariega

Imagem 2. Vista da marinha desde Algaida de La Caquera

Imagem 3. Vista panorâmica da marinha

Imagem 4. Mimbrales

Imagem 5. Aliviadero

Imagem 6. Passada Soto Grande.

1. INTRODUÇÃO

A área de estudo situa-se no município de Almonte (Huelva, Espanha), junto à povoação de El Rocio e dos parques Natural e Nacional de Doñana (Fig. 1.1). A história do Parque Nacional de Doñana começa em 1963 com a aquisição de 6974 ha, pelo Estado Espanhol em colaboração com o Fundo Mundial para a conservação da Natureza (WWF), e com a criação da Reserva Biológica de Doñana (RBD) (Fig. 1.1).

No ano 1969 cria-se o Parque Nacional de Doñana (PND) (Decreto 2412/69 de 16 de Outubro), albergando mais de 50720 ha de sistemas ecológicos de zonas húmidas, dunas móveis e “cotos” (áreas planas de areias eólicas estabilizadas). O parque é mais tarde ampliado e reclassificado pela lei 91/1978 de 28 de Dezembro. Desde então, diversas leis, planos e projectos nacionais e internacionais confluem neste território. Durante 1995 é consolidada a rede de Parques Nacionais, da qual faz parte o PND, com a criação do Organismo Autónomo de Parques Nacionais que é integrado, já em 1996, no Ministério do Meio Ambiente. Até ao ano 2007 os Parques Nacionais foram sendo geridos pelo Governo estatal de Espanha, mas no ano presente a gestão dos mesmos foi transferida para as Comunidades Autónomas onde se encontram esses parques. O Parque Nacional de Doñana passou a ser gerido pela Junta de Andalucía (Consejería de Medio Ambiente), que já era responsável pelas superfícies do Parque Natural de Doñana, que se encontram em torno do anterior. O conjunto de toda a área protegida (Parque Nacional e Parque Natural) passou a ser denominado de Espaço Natural de Doñana.

Esta zona desde sempre esteve relacionada com as actividades agrícolas, sendo a agricultura e a criação de gado as principais fontes de desenvolvimento económico nas zonas envolventes do PND. Durante a década de 1940 deu-se início ao cultivo das zonas húmidas e desenvolvimento do cultivo do arroz. Posteriormente a um estudo efectuado pela FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (FAO, 1970), no qual se concluiu que o subsolo da zona apresentava um elevado potencial para a actividade agrícola, o IRYDA (Instituto para la Reforma y el Desarrollo Agrário) decide implementar o Plano Geral de Transformação de Regadio, o qual se denominou de “Plano Almonte-Marismas”. Este plano pressupõe o desenvolvimento de três grandes sectores de regadio (Fig. 1.2): os sectores I, II e III. O Sector III localiza-se na parte noroeste do PND com uma extensão de aproximadamente 12.000 ha, que na actualidade compreendem 4.000 ha de regadio, 4.000 ha de sequeiro e 4.000 ha para ganadaria. Na década de 1970 o IRYDA realizou uma série de sondagens no Sector III para obter água de regadio para abastecer a zona. A partir de 1984 modificou-se, por parte do Estado, a transformação da zona por motivos ecológicos (Lozano, 2004).

Mas a partir dos anos 70/80 do século passado houve um grande aumento no número de explorações, cuja actividade principal se centrava no cultivo intensivo de morangos e, em menor medida, árvores de fruto. A ocupação e o uso do solo pelas actividades agrícolas alteram sensivelmente os processos biológicos, físicos e químicos dos sistemas naturais, colocando deste modo o frágil equilíbrio da zona em perigo. Este problema é exponencial, uma vez que se trata de uma área de forte actividade agrícola que assenta sobre um espesso nível de areias eólicas cuja rede de drenagem hídrica (superficial e subterrânea) corre, maioritariamente, para as zonas naturais protegidas do Parque Nacional. O tipo de solo (areias eólicas siliciosas sem matéria orgânica) facilita os fenómenos de lixiviado, que é uma das possíveis causas para o aumento da concentração de nitratos nas águas subterrâneas (Iglesias, 1999).

A água é um dos recursos naturais mais preciosos, como tal tem um papel fundamental no desenvolvimento e sustentabilidade do meio ambiente. Na comarca de Doñana não é diferente; aí a água é de uma importância vital para toda a área.

Outro dos problemas é que nestas zonas há inúmeras lagunas sazonais de origem maioritariamente freática, cuja funcionalidade ecológica e hidrológica pode ser afectada pela contaminação resultante da actividade agrícola. Os contaminantes agrícolas incorporam-se na água subterrânea através da infiltração das chuvas e dos excedentes de regadio, e as águas subterrâneas contaminadas descarregam para as lagunas e ribeiros. Os contaminantes também afectam o meio natural através da rede de drenagem superficial.

Muitos são os factores que podem contribuir para a contaminação, mas a principal problemática que se encontra na zona de El Rocio deve-se aos tipos de cultivo intensivo aí existentes (Custodio, 1994; Iglesias, 1999).

Deste modo, existe algum consenso no que respeita ao papel que a actividade agrícola tem na contaminação da zona em questão, ao ser uma actividade de elevado potencial degradante, que pode influir na qualidade da água. Na zona existem poços de bombagem e sondagens de observação piezométrica e química que podem ser utilizados como pontos de uma rede de vigilância da contaminação. Desde há 15 anos existe uma rede de observação, que hoje em dia não cobre toda a zona agrícola, uma vez que esta cresceu e se deslocou espacialmente nos últimos anos.

Porém, a tentativa de prever qual o grau de contaminação das águas subterrâneas face a uma determinada actividade, revela-se uma tarefa bastante complicada, uma vez que depende de diversos factores, tais como as características hidrogeológicas do meio, tipo de solo existente e actividade a desenvolver nessa área. O uso previsto do solo determinará, por um lado, quais serão os principais tipos de contaminantes com potencial de atingirem os níveis aquíferos e, por outro, quais as quantidades e os modos de aplicação desses mesmos contaminantes.

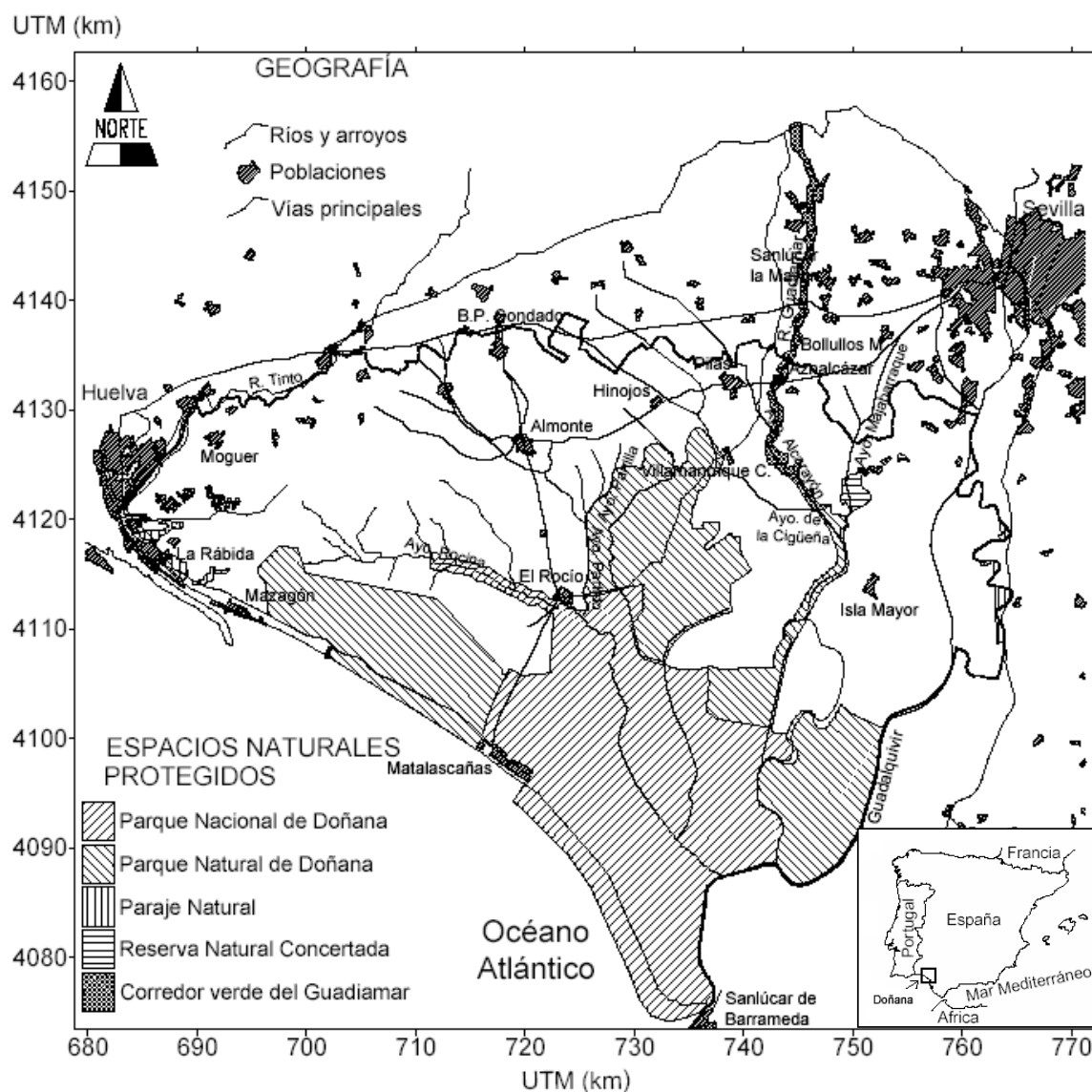


Fig. 1.1. Espaços naturais protegidos na Comarca de Doñana e respectiva qualificação, povoações e rede fluvial. Fonte: Custodio et al. (2007). Não se inclui a franja situada a Norte de Sanlúcar de Barrameda, "La Algaida".

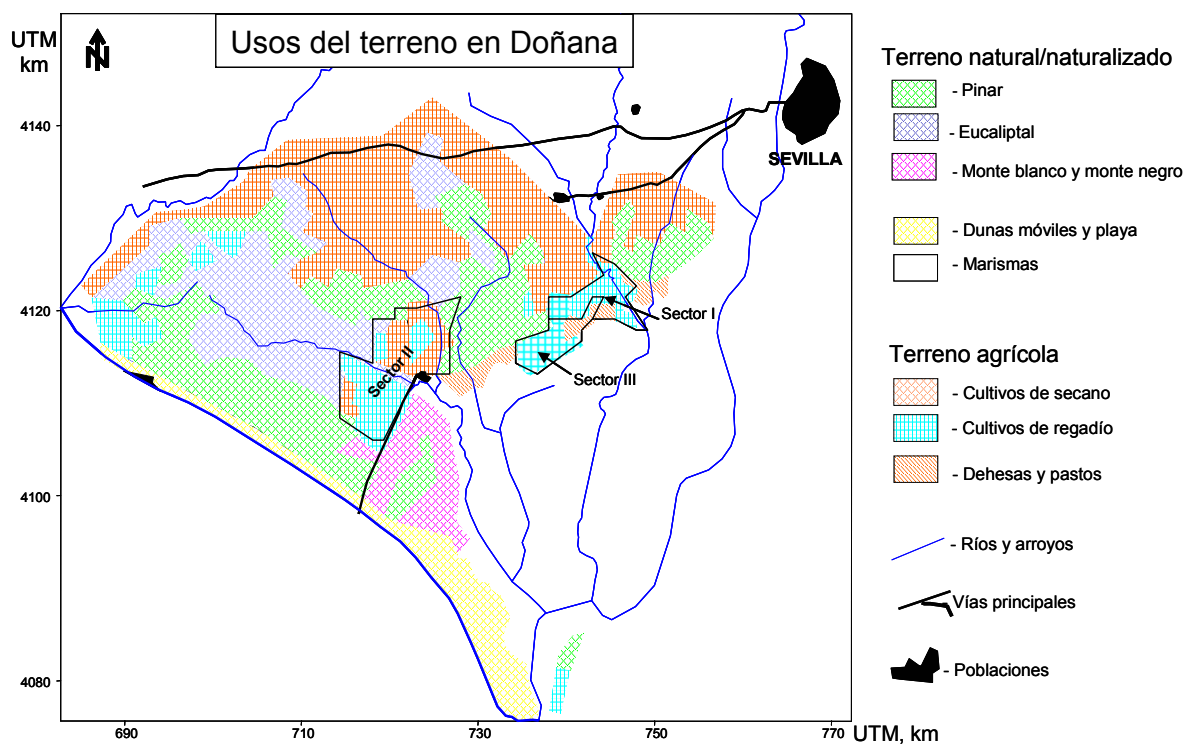


Fig. 1.2 Usos gerais do solo na Comarca de Doñana e envolvente. Fonte: modificado de UPC (1999).



Imagem 1. Panorâmica da marinha desde Canariega

2. OBJETIVOS

A Directiva Quadro da Água (Directiva 2000/60/CE) estabelece um marco comunitário de actuação na política das águas com o objectivo final de promover o uso sustentável dos recursos hídricos nos países pertencentes à União Europeia. Um aspecto importante no êxito deste projecto passa pela construção de redes de vigilância do estado qualitativo e quantitativo das águas, que permitam observar o estado actual, detectar possíveis tendências evolutivas, quer seja por aumento de concentrações, quer por modificação das condições naturais.

Um dos objectivos desta rede é melhorar o conhecimento da zona ou zonas onde seja introduzida, com vista a auxiliar na gestão de essa mesma zona, uma vez que quanto melhor é o conhecimento do meio a gerir, melhores serão as decisões adoptadas. Isto porque para se fazer uma boa caracterização do meio são necessários todo um conjunto de parâmetros fixos e imutáveis e de outras variáveis no tempo. Para os profissionais, sejam técnicos ou investigadores, as redes devem ser mais de observação do que vigilância, de forma a fornecer dados com estrutura de séries temporais para assim poderem dar resposta ao que lhes é pedido.

O objectivo deste trabalho é desenhar uma rede de observação da contaminação da água subterrânea por actividades agrícolas de um sector da zona de regadio do aquífero de Doñana.

Esta rede deve ter como finalidade a recolha de dados que permitam elaborar estratégias para a preservação da qualidade natural das águas subterrâneas e, caso se apresente alterada, restitui-la a níveis toleráveis; incorporação de ferramentas de observação para a detecção de problemas ou protecção de captações de interesse, e proporcionar informação para o conhecimento do meio hidrogeológico mediante interpretação hidrogeoquímica.

Um ponto fundamental deve-se centrar na representatividade das amostras, ou seja, estas devem ser representativas de um só aquífero, o que muitas das vezes não é tido em conta ao aproveitar como ponto de observação poços cuja finalidade é a captação de água, quanto mais melhor, pelo que estão ranhurados em todos os aquíferos atravessados. Sem este requisito, a avaliação do estado actual ou de tendências evolutivas deixam de ser rigorosas e a sua apreciação semi-qualitativa.

Este tipo de rede tem por objectivo a recolha de informação para estabelecer o estado actual das águas e tendências evolutivas a médio e longo prazo. Tem carácter estratégico e é apropriada em zonas cujas fontes contaminantes são de origem difusa e intensidade baixa ou moderada.

A interpretação adequada do estado qualitativo actual requer conhecimento prévio do fundo químico natural das águas e quais os mecanismos, naturais ou antrópicos, modificadores da qualidade. Este conhecimento deve-se basear numa série de observações mais restritas, das quais deve resultar a rede de controlo definitiva. A distribuição dos pontos de controlo deve-se situar nas zonas de recarga, que é onde se incorpora o contaminante e, portanto, é a zona mais adequada para controlar, isto se pretender dar primazia à componente prevenção face à de remediação.

No controlo de contaminantes de origem agrícola deve-se caracterizar não só a presença do contaminante, mas também analisar a sua mobilidade, persistência, mecanismos atenuadores, relação com cultivos e práticas agrícolas e distinguir as tendências de ciclo curto, de origem climática, das de origem antrópica.

Em resumo, esta rede deve estar orientada para a caracterização de processos, pelo que requer uma maior densidade de pontos de observação e frequência de amostragem, assim como uma interligação com programas edafológicos, agrícolas e climáticos, constituindo assim uma ferramenta básica para a criação de planos de gestão para a protecção das águas subterrâneas.

O controlo da Zona Não Saturada (ZNS) em estações piloto constituiria o complemento adequado para as redes específicas no controle de contaminantes agrícolas, em concreto nitratos e pesticidas, já que é na ZNS, especialmente na parte superior, que se produzem muitos dos processos de transformação que afectam a qualidade da água. A vigilância da ZNS melhoraria a informação àcerca de aspectos práticos tais como os factores que estão implicados na desnitrificação, influência da rotatividade dos cultivos na quantidade de contaminante nos lixiviados, influência da eficiência do método de rega na salinidade da recarga que chega ao aquífero, velocidade de transporte do contaminante na ZNS, etc.

Antes de começar a “desenhar” a rede, deve-se averiguar qual o tipo de sondagem, mais adequado, a aplicar. De acordo com estudos hidrogeológicos detalhados realizados nos últimos 15 anos (Custodio e Palancar, 1995; Trick e Custodio, 2003), na zona agrícola a água movimenta-se principalmente mediante fluxos verticais descendentes. Por tanto é necessário que a rede de observação permita controlar o deslocamento vertical dos possíveis contaminantes. Segundo trabalhos anteriores, em particular o de Iglesias (1999), a sondagem mais adequada será um poço multitubo, cujo interior aloja quatro tubos de pequeno diâmetro, cada um com um tramo de filtro a certas profundidades (Fig. 2.1).

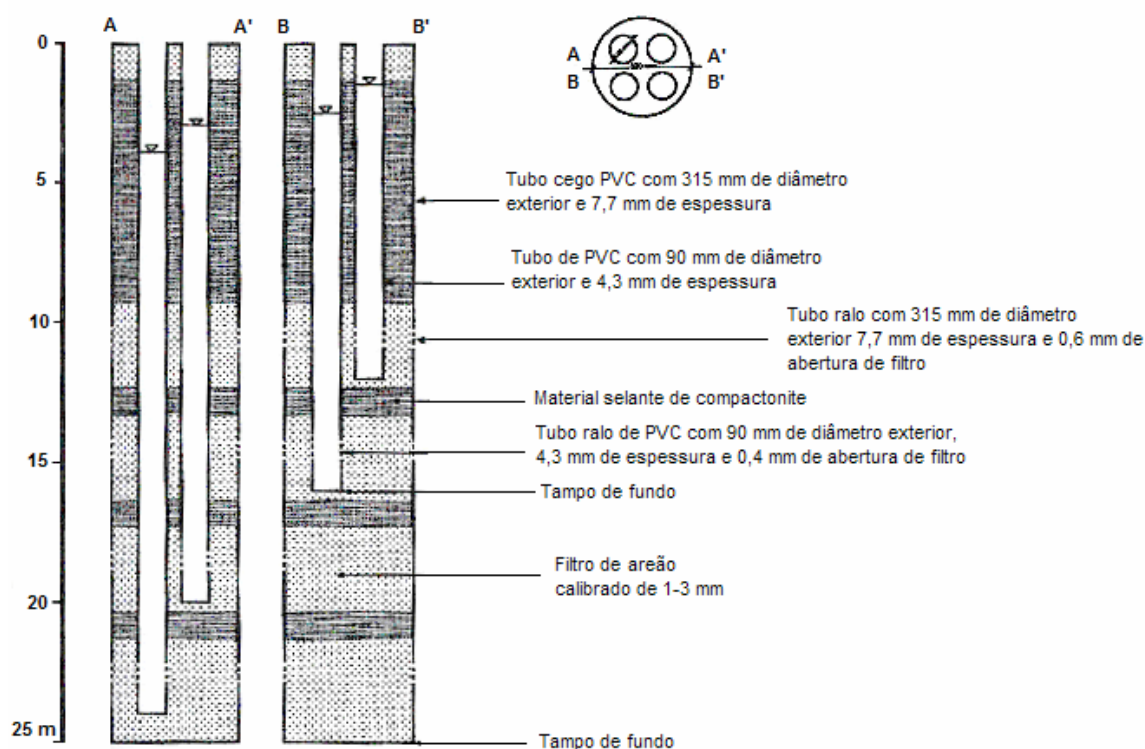


Fig 2.1 Esquema construtivo da perfuração desenhada para controlar a evolução dos nitratos em profundidade. Fonte: Iglesias (1999).

3. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DA ZONA

3.1 GEOLOGÍA

A zona de estudo encontra-se na depressão do rio Guadalquivir, a SW de Espanha. Geologicamente é formada por depósitos marinhos do Neogénico e por outros de origem fluvio-marinha e eólicos do Quaternário (Fig. 3.1).

Durante o Miocénico Superior – Pliocénico as condições de deposição predominantes, parecem corresponder às de uma bacia marinha de profundidade média a grande, na qual se depositaram grandes camadas de margas (Formação Margas Azuis). À medida que nos aproximamos do tecto, as margas são cada vez mais arenosas, o que indica que a bacia entrou num período regressivo. No final deu-se uma emersão, com erosão parcial do tecto da formação margosa, sobre a qual se depositaram sedimentos costeiro-litorais e deltáicos (Formação Deltáica). Nas zonas emersas gerou-se uma importante rede fluvial, assim como um “glacis” (Formação Aluvial) que chegou a ocupar uma extensão considerável. Posteriormente, entre o final do Pliocénico e princípios do Quaternário ocorre uma nova transgressão marinha, mas de menor envergadura em relação à do Miocénico Superior, instalando-se um golfo numa zona que coincide praticamente com a actualmente ocupada pelas marinhas. Simultaneamente a esta transgressão, provavelmente, iniciou-se o crescimento, na direcção SE, de uma barra litoral arenosa que paulatinamente fechou o golfo, convertendo este numa albufeira.

Durante o Quaternário ocorreram vários episódios generalizados de subida e descida do nível do mar associados a glaciações. Durante a última glaciação (Würm) o nível do mar encontrava-se mais baixo cerca de 120 m que o actual no Golfo de Cádiz (Somoza et al., 1996), e nestas condições a rede fluvial foi-se encaixando erodindo e arrastando grandes volumes de sedimentos. O depósito destes sedimentos deu lugar aos níveis de areia de ambiente aluvionar, lagunar e eólico que afloram no escarpado costeiro entre Matalascañas e Mazagón (Fig. 3.1). Estes depósitos estão elevados devido ao basculamento de blocos em resultado da tectónica regional recente.

No sector compreendido aproximadamente entre Mazagón (a Noroeste), El Rocío e a desembocadura do Guadalquivir, sobre as formações arenosas aluvionares foi-se acumulando durante o Quaternário um extenso depósito de areias eólicas, originadas em parte pela abrasão marinha das escarpas que se encontram a Oeste da zona. Estes depósitos formam um manto eólico hoje estabilizado que recobre uma boa parte da zona mais próxima à costa (Fig. 3.1). Apresenta espessuras bastante variadas, desde zero a vários metros, e tem um papel muito importante na recarga dos aquíferos e na cobertura vegetal. Em relação ao Sudeste as areias eólicas formam um largo cordão litoral de dunas móveis que se observam claramente desde Matalascañas na direcção da desembocadura do Guadalquivir. Em conjunto este manto eólico litoral é o maior campo dunar da Europa Ocidental.

A albufeira encheu-se, principalmente, devido a sucessivos carreamentos fluviais, juntamente com algumas interferências de origem marino-costeira, contribuíram à colmatação final. Assim, o avanço progressivo das areias pôde chegar a fechar, em muitos dos casos, as desembocaduras de algumas ribeiras e a dificultar, ou até mesmo impedir, a drenagem, o que originou ambientes lagunares locais, nos quais se proporcionaram as condições ideais para a formação de turfa.

Actualmente na costa ocorre uma intensa remobilização eólica, e nas marinhas uma colmatação, devido, fundamentalmente, a materiais detríticos finos. (Iglesias, 1999; IGME, 1992; Lozano, 2004; Manzano et al., 2007)

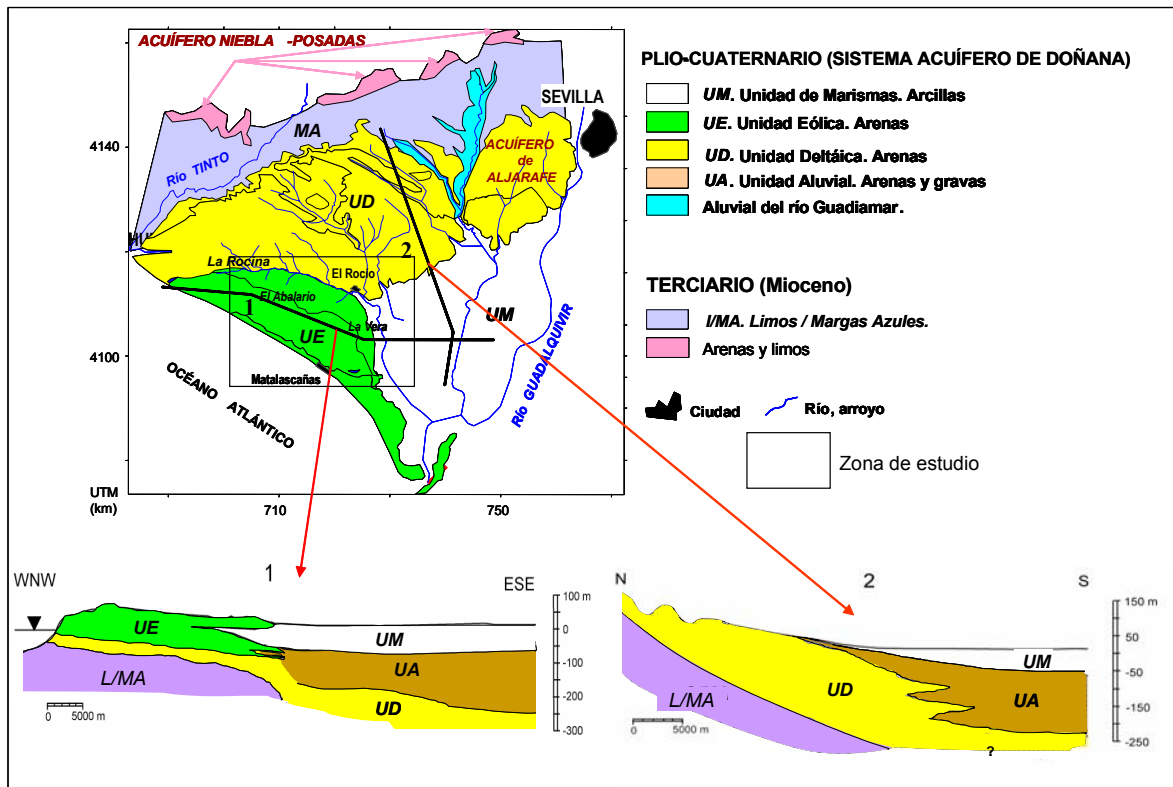


Fig.3.1 A) Mapa geológico de Doñana e Localização da zona de estudo. B) Corte geológico representativo da zona de estudo. C) Corte geológico actualizado da zona de estudo. Fonte: Manzano et al. (2007).

3.2 TECTÓNICA

O tecto das margas e limos azuis vai-se afundando em direcção à costa, alcançando profundidades perto dos 150 m a Oeste de Matalascañas e de mais de 250 m entre este povoado e a desembocadura do Guadalquivir (Fig. 3.1). As causas desta inclinação diferencial entre os sectores Este e Oeste são diversas.

Trata-se de uma confluência de processos ocorridos em épocas geológicas diferentes, tais como a subsidência isostática, a flexão da litosfera devido à formação (durante o Neogénico) das Cordilheiras Béticas, as mudanças eustáticas globais e a tectónica regional actuante durante o Quaternário, ainda activa, que originou uma fractura desde a costa Algarvia ao Guadalquivir em blocos delimitados por falhas de direcção NW-SE e NE-SW (Flores, 1994) (Fig. 3.2). Estes blocos bascularam na direcção SE, dando lugar a elevações topográficas de orientação NE-SW, às quais se adaptou a rede hídrica superficial, e zonas deprimidas a SE das mesmas, sobre as quais se instalarão as zonas inundáveis e marinhas. Este basculamento é responsável pela morfologia da frente costeira actual, com sucessivas frentes escarpadas que vão diminuindo de altura de W para E.

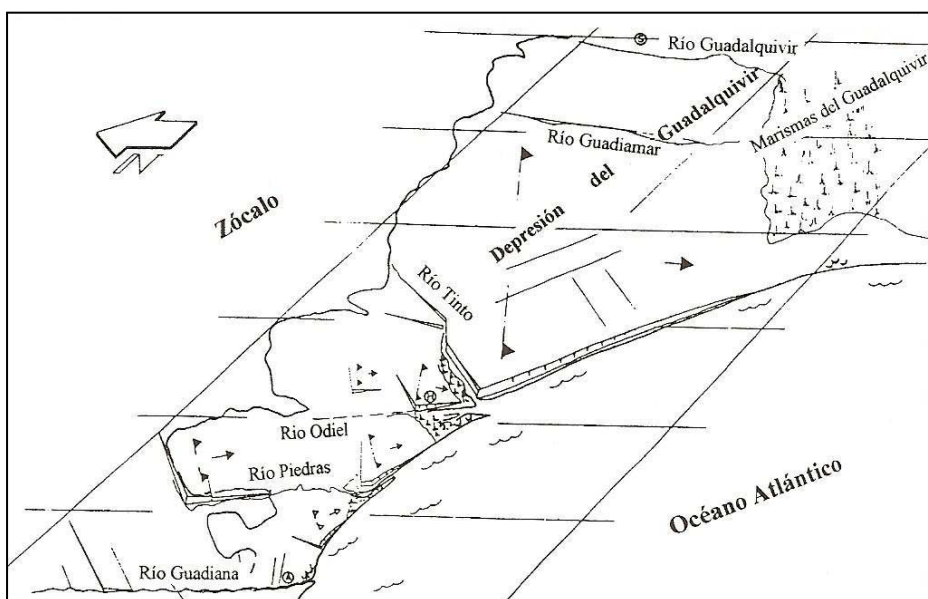


Fig. 3.2. Tectónica e morfologia da zona costeira. Fonte: Flores (1994).

3.3 HIDROGEOLOGIA

A zona de estudo localiza-se, totalmente, na unidade aquífera Almonte-Marismas. A unidade encontra-se limitada a Norte pelo afloramento das Margas Azuis que coincide, aproximadamente, com a estrada Sevilha-Huelva, a Este pelos rios Guadiana e Guadalquivir e a Sul e Oeste pelo Oceano Atlântico (Fig. 3.1).

Este sistema aquífero apresenta uma extensão total de 2700 km², dos quais 1800 km² estão ocupados por marinhas argilosas. A restante superfície é na sua maioria arenosa, especialmente o cordão litoral de areia (>70 km de extensão e cerca de 30 km de largura) que vai desde a desembocadura do rio Guadalquivir, ao Sudeste, até próximo do estuário do rio Tinto, a Noroeste.

O sistema aquífero está formado pelos materiais sedimentares Pliocénicos e Quaternários anteriormente descritos. Por tanto consiste em materiais principalmente arenosos, com uma menor presença de cascalheiras. As margas azuis do Miocénico constituem a base do aquífero.

Esta área arenosa suporta, em quase toda a área, as pequenas a médias zonas húmidas freáticas que aí existem. Por outro lado, a marinha constitui uma grande zona húmida de água salobra.

O sistema aquífero é recarregado pela água da chuva, a Oeste e a Norte da marinha. Sob condições não alteradas o fluxo da água subterrânea na área de estudo dirige-se sobretudo para Sul e para Este, em direcção à parte confinada do aquífero (Fig. 3.3). O sector SE da parte confinada do aquífero (unidade aluvionar e argilosa) encontra-se preenchida por água marinha antiga, que ficou aprisionada devido à baixa conexão hidráulica que existe desde a última estabilização holocénica do nível do mar.

Sob condições naturais a descarga de água subterrânea ocorria perto do limite entre as áreas confinadas e não confinadas e, o fluxo vertical faz-se através das argilas quaternárias na área confinada. Mas o fluxo natural, nas últimas três décadas, foi bastante alterado como resultado do aumento da bombagem para irrigação na área NE das margas e, menos dramático mas também com algumas alterações, na zona NW das argilas, em torno de El Rocio (Custodio et al. 2007).

As descargas de água doce subterrânea ao longo do contacto entre as areias e as argilas abastecem de água doce a fauna selvagem, especialmente durante o verão e nos anos secos. Na zona de descarga, a vegetação é mais densa e, formam-se diversas linhas de água pequenas (localmente denominados de caños) sazonais de origem freática. Estes ribeiros surgem tanto no contanto Oeste areias-marinha, como ao longo do escarpado costeiro que ocupa a margem ocidental do aquífero.

A intensa exploração do aquífero desde os princípios da década de 80, principalmente para regadio e abastecimento das urbanizações turísticas, mas localmente, também, para aplicações meio-ambientais, levou a uma descida dos níveis, freático e piezométrico profundos em áreas bastante consideráveis e, localmente (NE da marinha), gerou uma depressão piezométrica de grandes dimensões (Iglesias, 1999).

Como se pode observar na Fig. 3.3 b, os poços agrícolas encontram-se concentrados em volta do contacto entre as areias e as argilas, que são áreas de descarga natural de água subterrânea. Actualmente a maioria da água é bombeada da área confinada perto das margas, provocando uma redução nas descargas naturais, tais como mananciais, águas de infiltração e de evapotranspiração, que já é bastante severo para a vegetação local e lagos (Manzano et al., 2007). Além disto, foram detectadas inversões no fluxo entre a unidade aluvionar (confinada abaixo das argilas) e as argilas quaternárias a NE das margas, o que está a provocar a salinização dos poços agrícolas de água doce.

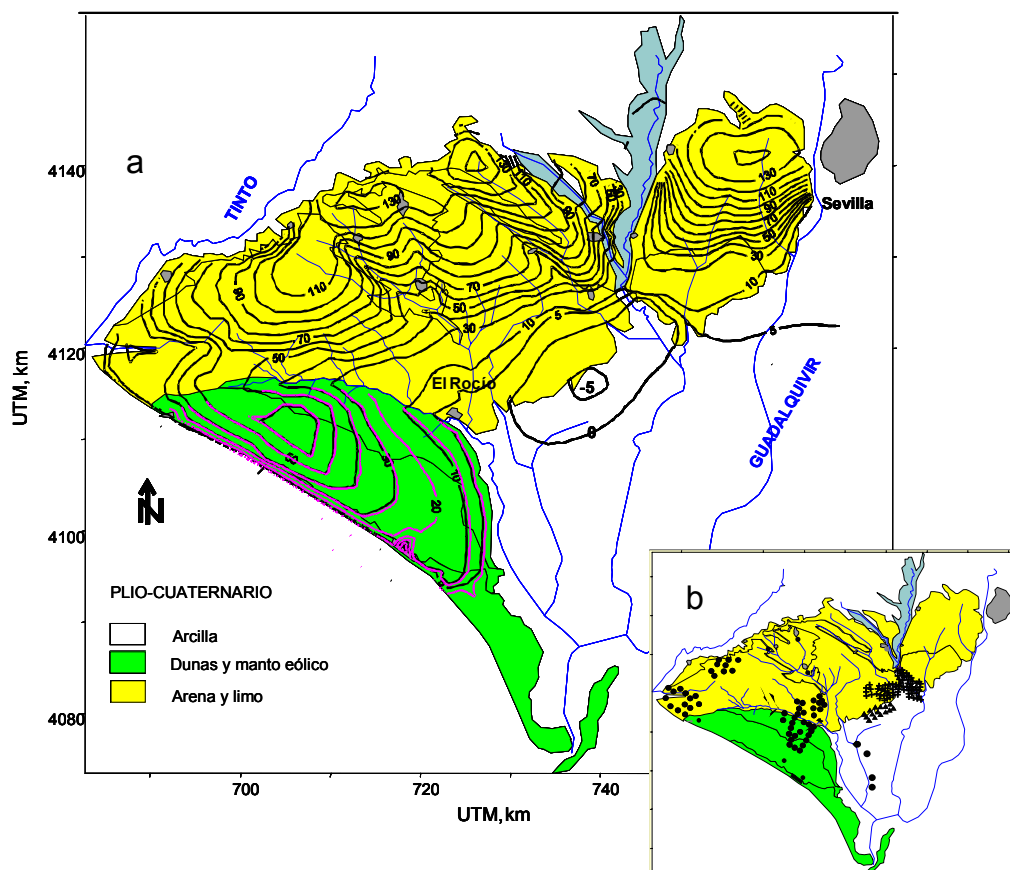


Fig.3.3 a) Representação da piezometria regional actual; b) Principais zonas de bombagem. Fonte: Manzano et al. (2007).

A dinâmica da marinha encontra-se actualmente influenciada em grande parte pelo regime de precipitações. Sazonalmente produzem-se ciclos de encharcamentos e dessecação controlados pelas chuvas.

A marinha de Doñana é alimentada por uma bacia de 3017 km², dos quais 1981 km² correspondem a zonas dunares, ao ribeiro de La Rocina, a pequenas bacias intermédias e à própria marinha. A superfície restante, 1036 km², corresponde à bacia do rio Guadiamar, encaminhado na sua parte final ao longo do Braço de la Torre indo desaguar à marinha apenas em situações de caudais extremos correspondentes a períodos de chuvas fortes na bacia (Custodio et al. 2007).



Imagem 2. Vista da marinha desde Algaida de La Caquera

3.4 HIDRODINÂMICA

Na zona de estudo existe uma rede de controlo piezométrico formada por cerca de 40 piezómetros, construídos por diferentes organismos que se encontram a distintas profundidades e apresentam diferentes características. Alguns destes fazem parte da rede de controlo da Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG). Estes pontos de observação consistem em piezómetros de PVC de dois tipos: a) com várias secções ranhuradas em profundidade; b) grupos de 2 a 4 piezómetros, perfurados a distintas profundidades e com uma única zona de filtragem para cada profundidade.

Lozano (2004) subdividiu no seu trabalho a área de estudo em quatro subzonas. Dado que a zona de trabalho da presente tese coincide praticamente com a deste autor, foi adoptado também essa subdivisão para explicar o funcionamento do aquífero. Este consiste na Subzona Ecotono, Subzona Costa, Subzona Complexo Lagunar, Subzona Interior Norte (Fig. 3.4). A descrição da evolução dos níveis piezométricos em cada subzona e as causas que se expõem seguidamente foram retiradas de Lozano (2004) e de Custodio (1994).

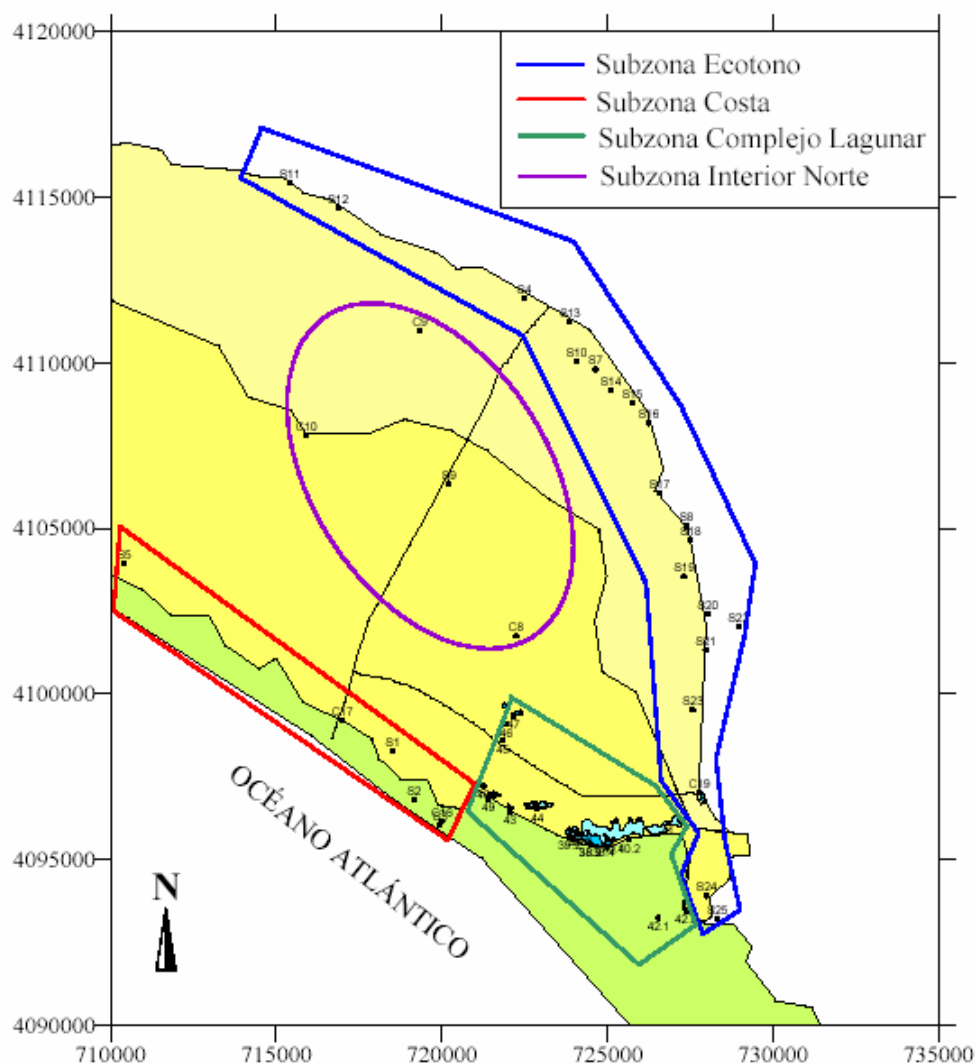


Fig. 3.4 Mapa de situação dos pontos piezométricos e distribuição das subzonas. Fonte: Lozano (2004).

Subzona Ecotono

A evolução dos níveis nas sondagens, situadas mais a Norte nesta zona, a diferentes profundidades, é semelhante e segue a evolução temporal da precipitação mensal da zona. Verifica-se que os níveis piezométricos máximos são atingidos após épocas de precipitação máxima; em geral os níveis mantêm-se bastante constantes. Nesta zona pode-se observar que os níveis mais profundos encontram-se acima dos mais superficiais, sendo inclusivé repuxantes grande parte do tempo. Isto é indicativo da existência de fluxos verticais ascendentes que alimentam o ribeiro de La Rocina.

Continuando, em direcção a Sul e entrando no ecotono (contacto entre as areias e as argilas da marinha), existe uma zona afectada pelas bombagens de regadio do Sector II do Plano Almonte-Marismas. Os níveis de alguns dos piezómetros, situados entre La Rocina e Canariega, estão afectados pelas bombagens. Estas bombagens extraem a água subterrânea em profundidade, afectando principalmente os níveis piezométricos das sondagens cujo filtro se encontra a maior profundidade. Também se pode observar como os níveis mínimos ocorrem nos meses estivais, quando a

bombagem é máxima. Começam a recuperar a partir de Outubro, devido às chuvas da época e diminuição das explorações até alcançar os níveis máximos nos meses de Inverno.

As variações dos níveis dos piezómetros mais superficiais são mais suaves que as dos mais profundos. Os pontos mais superficiais situam-se num nível formado por areias de tamanho fino a médio. Este tipo de materiais apresenta uma permeabilidade inferior à dos materiais mais grosseiros que se encontram a maior profundidade nesta zona. A diferença de permeabilidades e o facto de que se bomba na zona mais profunda, e mais permeável, podem ser a causa para as diferentes respostas à influência das bombagens.

Durante o Inverno não há extracções e as unidades profundas possuem potencial hidráulico acima das superficiais, indicando a existência de fluxos ascendentes, sendo as imediações do ribeiro de La Rocina a zona de descarga. Mas nas épocas estivais, quando as extracções de água subterrânea são máximas, produz-se uma inversão no gradiente, já que a depressão dos níveis profundos leva a que o fluxo se inverta. Como consequência, durante o ano o sentido do fluxo vertical passa de ascendente no Inverno a descendente no Verão, passando de uma zona de descarga em regime natural a zona de recarga em regime influenciado (Lozano, 2004; Custodio, 1994).

Ao longo do ecotono os níveis são aparentemente controlados pela precipitação, onde também se podem observar diferentes comportamentos segundo a profundidade da sondagem. Nas épocas de chuvas os piezómetros são na sua maioria repuxantes, mas nalgumas estações produzem-se inversões no fluxo.

Os efeitos de bombagem encontram-se mais atenuados nos piezómetros mais superficiais, fazendo sentir o seu efeito nos níveis profundos, uma vez que a extracção se realiza em profundidade.

Subzona Interior Norte

Nesta zona existe uma grande heterogeneidade no comportamento dos níveis de cada piezómetro. Os efeitos de bombagem nos pontos mais superficiais encontram-se atenuados, uma vez que também aqui a extracção se realiza em profundidade. É também uma zona de recarga, sendo os níveis piezométricos das unidades superficiais mais altos que os das unidades profundas.

Subzona Complexo Lagunar

Aqui a evolução dos níveis é influenciada pelo regime de precipitação, uma vez que os piezómetros desta zona são superficiais. O comportamento do nível freático está condicionado pelas oscilações da recarga.

Subzona Costa

Nesta zona os níveis são influenciados pelas extracções que se realizam para abastecer as urbanizações de Matalascañas e Mazagón.

Estes efeitos são muito evidentes no verão, que é quando aumenta a procura e, consequentemente, as extracções que ocasionam inversões no sentido do fluxo subterrâneo. Nesta zona os níveis das unidades superficiais e intermédias estão acima

das profundas, indicando deste modo a existência de fluxos descendentes, caracterizando esta zona como zona de recarga.

De um modo geral a exploração de poços agrícolas produziu notáveis descidas no nível piezométrico, em toda a área, afectando principalmente as camadas profundas. Como consequência originou-se um gradiente piezométrico na área de estudo que pode variar entre os 2 a 5 metros nas épocas de baixa procura de água agrícola e incrementar-se para os 4 a 12 metros nas épocas de alta procura. Existem alterações consideráveis de um ano para o outro, não só devido às flutuações pluviométricas mas também devido às alterações produzidas pela actividade agrícola de regadio.

Por tanto, na zona de estudo há áreas onde a água se move verticalmente, sentido descendente (basicamente na zona central) e outras onde o fluxo dominante é vertical, sentido ascendente (áreas periféricas). Isto sugere a necessidade de desenhar pontos de observação de diferentes comprimentos compostos por um único tramo de tubo ralo, para poder observar a deslocação dos contaminantes.



Imagem 3. Vista panorâmica da marinha

4. MATERIAIS E METODOLOGIA DE TRABALHO

4.1 MATERIAIS

Para a realização deste trabalho foi recolhida a seguinte informação:

1. Dados químicos e sondagens

A partir de uma base de dados geral confeccionada pelo grupo de hidrogeología da Universidade Politécnica da Catalunha e da Universidade Politécnica de Cartagena, a qual abarca todo o aquífero de Doñana, foram obtidas análises químicas completas de águas subterrâneas de 109 sondagens que cobrem toda a zona de estudo, apesar de não ser de uma forma homogênea.

Dos diversos componentes analisados, os de maior relevância para levar a cabo este estudo foram: NO_3^- , SO_4^{2-} , pH e Condutividade Eléctrica (CE).

Os dados recolhidos datam de 1991 até à data do início da realização deste trabalho, ou seja, um período temporal que vai de 1991 a 2007. O autor deste trabalho participou na campanha de amostragem em Novembro de 2006 (Fig. 4.1.).

Tipos de sondagens e poços de amostragem:

- Sondagens SGOP, realizados pelo antigo Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) para a Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG). Cada ponto é constituído por varias sondagens efectuadas a diferentes profundidades, de filtro curto. Estes furos realizaram-se por rotação com circulação directa. Nas sondagens mais superficiais utilizou-se como fluido de perfuração a bentonite e, nos mais profundos polímeros orgânicos (GS 550 biodegradável). A perfuração foi do tipo telescópico, com tubos metálicos exteriores de construção de distintos diâmetros dispostos concêntricamente. O acabado é de tubo PVC de 113 mm de diâmetro, com juntas enroscadas e seladas. Excepto o tramo de filtro no extremo final, que se colocou um pequeno tubo cego fechado no seu extremo inferior; o seu exterior está cimentado (Fig. 4.2).

Os SGOP mais superficiais localizados nas zonas de descarga do aquífero foram perfurados com injeção de água e entubados com PVC de 113 mm de diâmetro.

- Sondagens C, estes furos foram perfurados a rotação por circulação directa, utilizando como fluido de perfuração a bentonite e/ou polímeros orgânicos (SBF Viscopól). Todos foram equipados de tubagem roscada de PVC de 150 mm de diâmetro nominal e de 7,5 ou 9,5 mm de espessura. As zonas de filtro têm uma abertura de 0,7mm. A perfuração realizou-se com um diâmetro de 445 mm e/ou 311mm, o espaço anelar compreendido entre a perfuração e o tramo do filtro encontra-se preenchido com areão silicioso calibrado de 1-3mm de diâmetro, as zonas não filtrantes encontram-se cimentadas (Fig. 4.2).

- Sondagens piezométricas UPCT (realizados pela Universidade Politécnica de Cartagena); foram efectuados manualmente através de um trado com alargador acoplado a um sistema de hastes, estes são furos bastante superficiais, de zona filtrante curta (Fig. 4.3). Todos foram equipados com tubagem de PVC de 50 mm de diâmetro nominal e 4 mm de espessura. Os filtros têm uma abertura de 0,5 mm e encontram-se envolvidos numa manga geotextil. O espaço anelar compreendido entre a perfuração e o tramo de filtro, foi preenchido por areão silicioso calibrado, de 1-3mm de diâmetro, até

cobrir a secção filtrante. O espaço restante foi preenchido com material da perfuração. À volta da boca da sondagem foi construída uma protecção com tampa.

As sondagens são na sua grande maioria de zona filtrante curta, na maior parte dos casos não tem mais de 1-2 m, com a excepção do furo P-1. Cada grupo de sondagens é constituído por vários furos a diferentes profundidades, apresentando assim uma amplitude bastante variável, partindo de níveis superficiais até níveis mais profundos, excepto as sondagens UPCT que se centram na zona de água freática, ou seja, níveis mais superficiais. À parte do UPCT-5 que se encontra em zona agrícola, todos os restantes furos estão situados em linhas de água ou perto destas.

Dados técnicos das perfurações amostradas: profundidade, localização da profundidade do tramo filtrante, diâmetro, data de perfuração, técnica de perfuração, etc; todas as informações respeitantes a este ponto encontram-se resumidas no Anexo 1 deste trabalho (Tabela 1).

2. Documentação (mapas, teses, artigos científicos)

Muitos têm sido os trabalhos relacionados com o tema da contaminação agrícola, sendo os seguintes os principais trabalhos consultados para a realização deste estudo:

Custodio, E. (1994). Este trabalho aborda exclusivamente as causas da contaminação, seus processos e possíveis impactos na área de Doñana (Huelva).

DAS (2006). DIRECTIVA 2006/118/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, de 12 de Dezembro de 2006, relativa à protecção das águas subterrâneas contra a contaminação e a deterioração.

DMA (2000). DIRECTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, de 23 de Outubro de 2000, na qual se estabelece um marco comunitário de actuação no âmbito da política das águas.

Iglesias, M. (1999). Esta tese centra-se na zona de El Abalário, com o objectivo de conhecer as características do aquífero na unidade de El Abalário e apresenta uma caracterização hidroquímica detalhada das águas subterrâneas desta zona. Também aborda o tema da contaminação, apontando as principais fontes causadoras do problema.

Lozano, E. (2004). Esta tese centra-se na área de Los Cotos. Aqui a autora faz uma revisão ao modelo conceptual de fluxo da água subterrânea, caracterizando também, química e isotópicamente, o fluxo de forma a determinar os seus processos de alteração química e composição isotópica. O objectivo deste trabalho foi melhorar o conhecimento acerca dos factores hidrogeológicos que afectam as zonas húmidas.

Manzano, M.; Custodio, E. e Colomines, M. (2005). Este trabalho trata a caracterização do aquífero de Doñana relativamente ao seu fundo químico. Descreve as suas principais fontes de recarga e respectivas características químicas.

Trick, T. e Custodio, E. (2003). Este trabalho abarca a zona do sector ocidental (El Abalário) de Doñana, descrevendo as suas características geológicas e hidrogeológicas, cujo objectivo foi estabelecer um modelo hidrológico conceptual, que caracteriza o aquífero nesta zona.

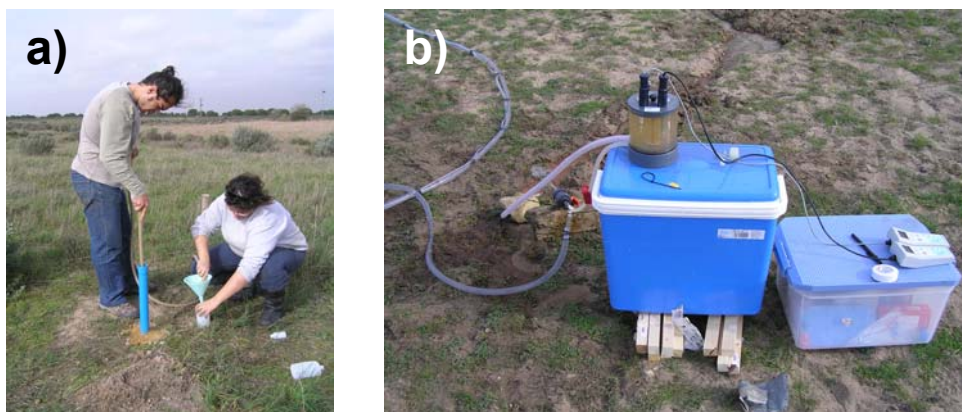


Fig. 4.1. a) Obtenção de amostras de água numa sondagem manual; b) medição de parâmetros químicos no campo (pH, condutividade eléctrica, temperatura).

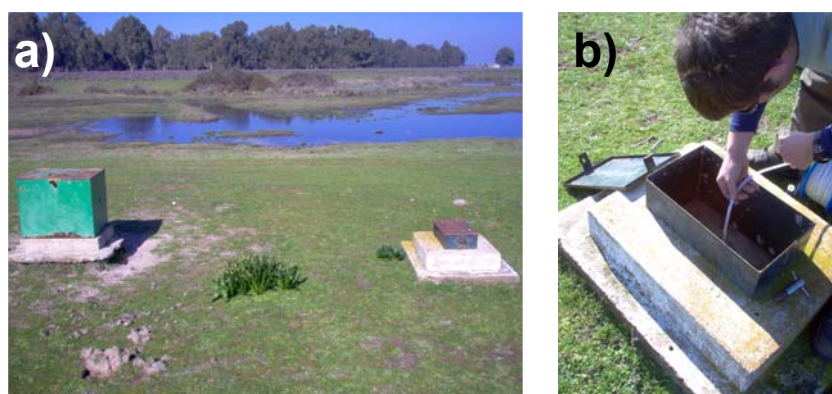


Fig. 4.2. a) Exemplo de sondagens da série SGOP e C (vários piezómetros a diferentes profundidades); b) medição do nível piezométrico.



Fig. 4.4. Construção das sondagens manuais da série UPCT. a) Perfuração; b) aspecto da tubagem; c) cravamento da tubagem.

4.2 METODOLOGIA USADA

1. Análise da evolução espacial e temporal das concentrações de NO_3 mediante gráficos e mapas de distribuição a diferentes profundidades e para dois períodos distintos.

Para a análise destes parâmetros, construção de gráficos, tabelas e mapas, foram utilizados os seguintes programas: Microsoft Excel e Arcview.

Com o auxílio do Microsoft Excel foram elaboradas tabelas com a informação relativa à data de amostragem, profundidade a que se encontra o filtro, parâmetro analisado e respectiva concentração. Os dados químicos foram organizados em dois grupos: para as amostragens mais antigas, ou seja, para valores que datam de 1991 a 1997 e para as amostragens mais recentes cujos dados vão de 1998 a 2007. A separação temporal é algo arbitrária. Como a distribuição temporal dos dados disponíveis não permite comparar um grande número de dados mais antigos com outro grande número de dados mais recentes, decidiu-se agrupar todos os dados disponíveis em dois períodos, cada um deles enquadra-se aproximadamente nos anos em que mais trabalhos se realizaram (1994-96 e 1999-2001).

Com estes dados elaboraram-se os respectivos gráficos de evolução temporal, onde se pode observar a evolução do parâmetro em análise, em função do tempo para cada sondagem. Também se construíram dois gráficos de concentração Vs profundidade, um com os dados mais antigos e outro com os mais recentes, podendo deste modo estabelecer-se um termo de comparação relativamente à evolução (neste caso do nitrato) em profundidade, antes ou durante e após as práticas agrícolas intensivas.

A partir do Microsoft Excel elaboraram-se várias folhas de cálculo para diferentes intervalos de profundidade, nos quais se colocou informação relativa às sondagens que se enquadrassem nesse intervalo, como espécie química e respectiva concentração e coordenadas X, Y. Ao gravar estas folhas aplicou-se o formato dbf, com vista a aplicá-las no Arcview, construindo assim os mapas de localização de furos e respectiva concentração do parâmetro a analisar (neste caso nitrato). A partir destes mapas uma vez que estão divididos por intervalos de profundidade, é possível fazer uma ideia das zonas afectadas e respectivos valores de concentração medidos, para os diferentes intervalos de profundidade: 0-5 m; 5-15 m; 15-30 m; 30-45 m. Estes mapas auxiliaram a escolha da profundidade a que se devem perfurar as novas sondagens e suas possíveis localizações. Para a execução destes mapas foram utilizados os dados mais recentes de cada período, isto é, nos mapas de 1991 a 1997 os dados utilizados são na sua maioria do ano de 96 ou 97 e, nos mapas do período mais recente, os dados utilizados são sua maioria de 2006.

Também com o auxílio das ferramentas da estatística descritiva do Excel foram elaborados os parâmetros estatísticos média, mediana, e os percentis 2,3; 25; 75 e 97,7 das concentrações de NO_3^- para cada intervalo de profundidade definido (0-5 m, 5-15 m, 15-30 m e 30-45 m) e para os dois períodos temporais comparados (1991-1997 e 1998-2007). O objectivo foi auxiliar o estudo da evolução da contaminação por Nitratos quer no tempo quer em profundidade.

5. ESTUDO HIDROQUÍMICO GERAL

De acordo com Manzano et al. (2005), à escala regional (todo o aquífero) é possível verificar que a salinidade das águas subterrâneas do aquífero varia dentro de três ordens de grandeza. Além disto, ao representar todas as amostras em diagramas, parece que muitas das águas são resultado de mistura dos dois termos extremos: um doce, com condutividade eléctrica (CE) $\leq 1 \text{ mS cm}^{-1}$ e principalmente do tipo Na-Cl (localmente NaCa-ClHCO_3 ou Ca-HCO_3); outro salino, com $\text{CE} \geq 1-80 \text{ mS cm}^{-1}$, maioritariamente do tipo Na-Cl (Fig. 5.1).

O extremo doce, do tipo Na-Cl, corresponde à água subterrânea mais característica do sector ocidental do aquífero até aos 40-50m de profundidade, enquanto que as águas doces, do tipo NaCa-ClHCO_3 , são características do sector a Norte da marinha. O extremo salino é característico do sector confinado, e também de alguns níveis superficiais do Manto Eólico em volta das lagunas freáticas internas do cordão dunar costeiro, que estão submetidas a evaporação. Algumas amostras são na realidade resultado da mistura vertical entre a água doce, mais ou menos profunda, que flui para cima perto ou no contacto areias-marinha e a água salina intersticial das argilas, mas muitas outras resultam da concentração resultante da evaporação nas lagoas costeiras e em volta destas. Adicionalmente, as águas freáticas da vertente marinha do cordão dunar devem a sua salinidade principalmente ao aerossol marinho.

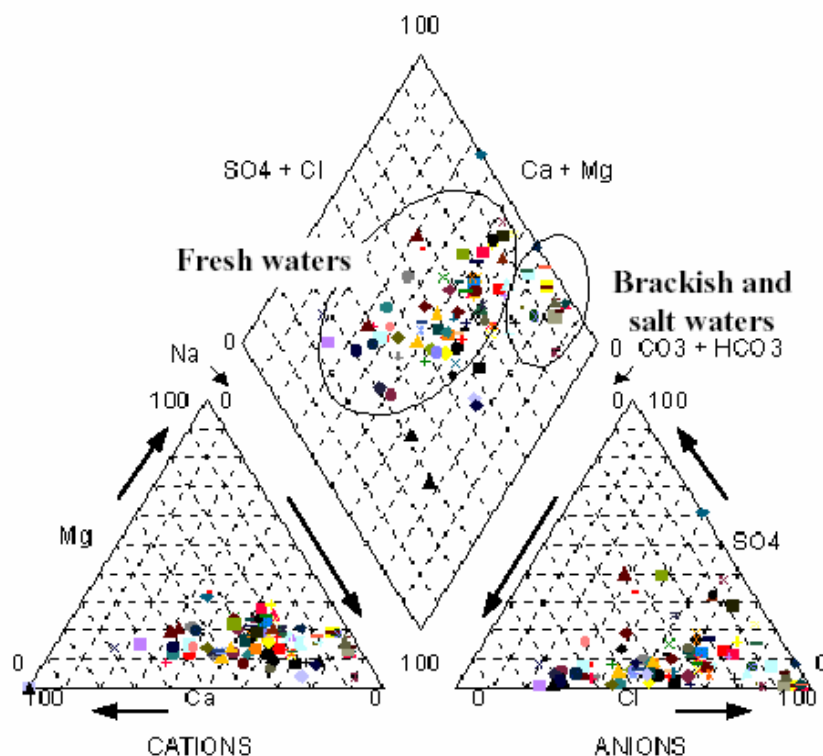


Fig. 5.1. Águas subterrâneas representativas da área estudada. Os círculos discriminam as águas de tipo Na-Cl que são doces ($\leq 1 \text{ mS cm}^{-1}$) das que são salinas ($> 1 \text{ mS cm}^{-1}$). Fonte: Manzano et al. (2005).

Os mesmos autores concluem que na zona não confinada ocidental do aquífero, a hidroquímica da água subterrânea é basicamente influenciada pelo fundo natural, salvo no sector agrícola perto de La Rocina e El Rocio (que é a área objecto deste projecto), onde o fundo natural já se encontra modificado, de forma generalizada, devido principalmente à actividade agrícola. No sector confinado do aquífero, abaixo das marinhas, a hidroquímica corresponde basicamente ao valor de fundo natural, com algumas modificações na área agrícola a NE da marinha.

A uma escala mais pequena, na zona do aquífero tida em conta neste trabalho, é possível definir duas unidades hidrogeológicas, Unidade Superior e Unidade Inferior, em função das características geológicas e da hidroquímica das águas amostradas em cada unidade (Iglesias, 1999; Lozano, 2004; Manzano et al. 2005). Como se pode observar na Fig. 5.2 estas duas unidades encontram-se bem diferenciadas.

O valor de fundo químico destas águas é o resultado, principalmente, das reacções químicas entre a água da chuva e os minerais do terreno, além da concentração por evaporação na zona freática e dissolução de CO₂ edáfico.

As águas subterrâneas da Unidade Superior caracterizam-se por ser principalmente do tipo cloretadas-sódicas. Isto deve-se à baixa reactividade das areias siliciosas que constituem o aquífero e à quase total ausência de minerais solúveis nas camadas superiores de areias. Estas águas apresentam uma mineralização bastante baixa (CE < 250 µS/cm). Os valores máximos de CE que aparecem (CE ≈ 1 mS/cm) reflectem pontos onde se produz uma mistura da água subterrânea com a água das lagunas, mais concentrada por evaporação à superfície. Contudo estas águas ocorrem de forma muito localizada espacialmente e fora da área de actividade agrícola.

Os valores de pH na Unidade Superior são ácidos (pH < 7). Iglesias (1999) diz que provavelmente se deve a que muitas das amostragens correspondem a água de recarga, a pouca profundidade, como consequência o CO₂ do solo não reagiu o suficiente para que o pH subisse.

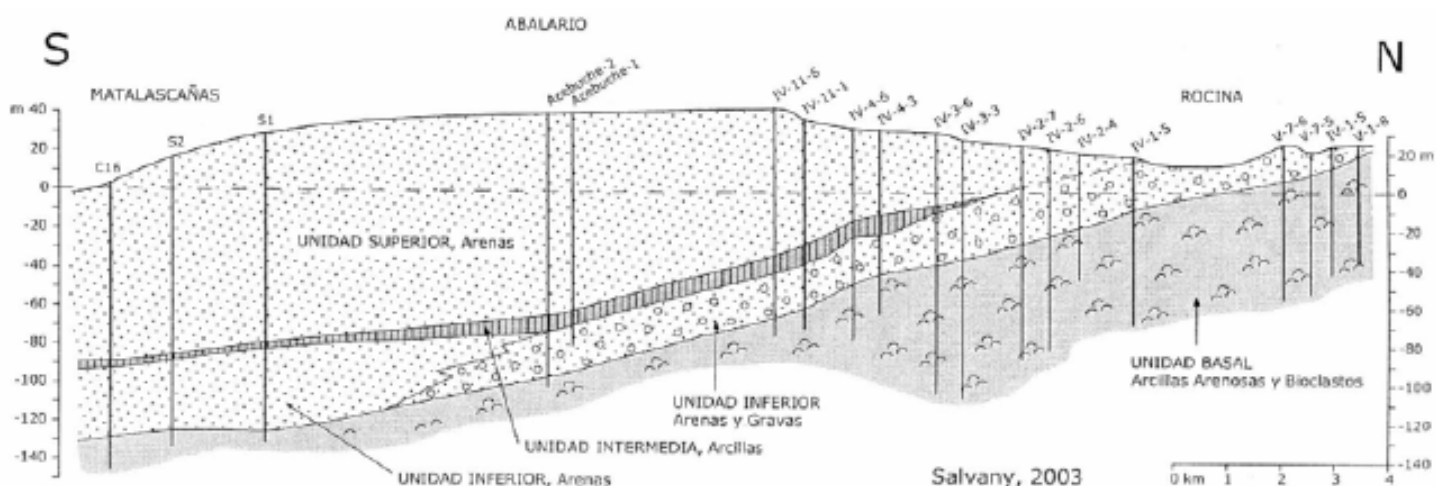


Fig. 5.2. Esquema geológico que mostra as duas unidades hidrogeológicas, Superior e Inferior. Fonte: Lozano (2004).

As águas subterrâneas da Unidade Inferior são do tipo bicarbonatado-sódico-cálcico ou cálcio-sódico, devido à presença de CaCO_3 nas camadas inferiores do aquífero. Os valores de pH são um pouco mais elevados, estando entre os 6,5 e 7,5, facto que se atribui às reacções químicas com os carbonatos em profundidade (Fig. 5.3).

Os valores de condutividade eléctrica na Unidade Inferior encontram-se entre os 115 e 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esta diferença de amplitudes é bastante inferior à das águas subterrâneas da Unidade Superior; e a sua mediana indica que as águas subterrâneas da Unidade Inferior são algo mais mineralizadas. A causa disto é, fundamentalmente, a dissolução de carbonatos, já que os restantes minerais são os mesmos silicatos que se encontram na Unidade Superior (Fig. 5.3).

Na Fig. 5.3. observa-se que há poucos componentes que estão em maiores concentrações (em termos estatísticos) na Unidade Superior em relação à Unidade Inferior. Trata-se de componentes característicos dos produtos agroquímicos (SO_4^{2-} , NO_3^- , Co, Cu, Zn), e indicam que existe uma certa contaminação agrícola que está a afectar as águas da Unidade Superior, pelo menos de um modo generalizado.

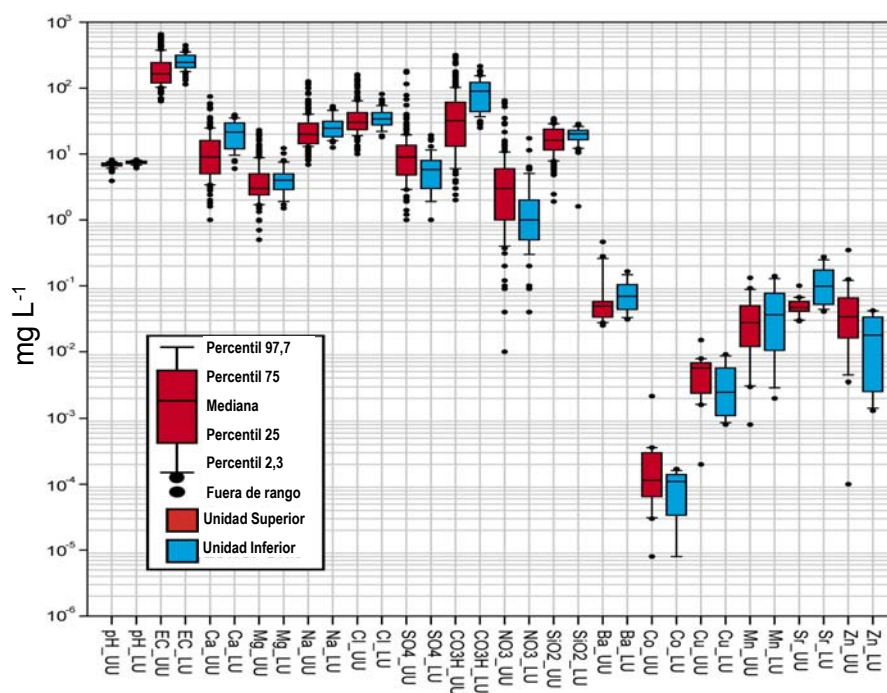


Fig. 5.3. Principais características químicas das águas da Unidade Superior e da Unidade Inferior. Fonte: Manzano et al. (2005).

6. ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO AGRÍCOLA

6.1 FONTES DE NO₃ NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA ZONA DE ESTUDO

Parte da zona de recarga do aquífero é ocupada por solo para uso agrícola, o qual é praticamente destinado para cultivos de regadio (Iglesias, 1999). As áreas cultivadas que afectam a zona de estudo encontram-se no Sector II “del Plan Reglable Almonte-Marismas” (ver Fig. 1.2).

As principais actividades agrícolas estão relacionadas com o cultivo de morangos, citrinos e mirtilos. O método de rega mais empregue é por gota a gota e por aspersão. É prática comum aplicar os fertilizantes dissolvidos na água de rega.

Nesta zona a recarga do aquífero tem como origem a infiltração da água da chuva e dos excedentes de rega. Como consequência, o aquífero é susceptível de contaminação derivada das práticas agrícolas (Tabela 6.1). A recarga contaminada que chega ao aquífero freático vai-se incorporando nas zonas mais profundas do aquífero devido ao sentido do fluxo existente na zona. Como já referido na secção 3.4, este fluxo é vertical descendente e está incrementado pelas bombagens que se realizam na parte mais profunda, entre os 45-55 m, onde se encontram os níveis litológicos mais permeáveis.

Dada a pobreza do solo em matéria orgânica, o carácter arenoso franco e a frequência de rega para manter a humidade do solo necessária para o cultivo, parece lógico esperar que os excedentes de rega que se infiltram lixiviem uma fracção notável das substâncias solúveis transportadas. O problema não reside no cultivo de morangos ou outras frutas, mas na forma de aplicação, intensiva, de fertilizantes e outros aditivos na agricultura para que os produtos possam atingir mais rapidamente as características exigidas no mercado. A parte que a planta não utiliza, ou que não se destrói é lixiviada pela água de infiltração e concentrada na recarga aos aquíferos subjacentes aos campos de cultivo (Custodio, 1994).

A quantidade de nitratos que possam atingir a água subterrânea depende da quantidade de fertilizantes aplicados e do método de aplicação destes (Iglesias, 1999). Como já mencionado, um dos cultivos mais praticado é o dos morangos cultivo em que as perdas de nitrato por lixiviação se vêem favorecidas pelo sistema radicular pouco profundo que desenvolvem e pela grande quantidade de compostos nitrogenados que são adicionados.

Os fertilizantes inorgânicos ou minerais contêm N, P, K, (Nitrato, Fosfato, Potássio), quer de forma separada, quer formados por misturas de diversos componentes. Em função dos nutrientes que estes contêm denominam-se simples (com apenas um dos elementos primários), ou compostos (com 2, ou com os três elementos primários). Fala-se de fertilizantes complexos quando estes contêm elementos maioritários juntamente com alguns minoritários.

Tabela 6.1 Efeitos das actividades agrícolas sobre a qualidade da água. Fonte: Javier Bayo (Comentário pessoal: apontamentos Impacto Ambiental, UPCT.)

ACTIVIDAD AGRÍCOLA	EFFECTOS	
	Aguas superficiales	Aguas subterráneas
Labranza	Materia particulada que transporta fósforo y plaguicidas adsorbidos. Pérdida de hábitat en lechos de ríos y lagos	
Aplicación de fertilizantes	Escorrentía de nutrientes (N y P) que dan problemas de eutrofización, mal sabor y olor en agua de abastecimiento público	Lixiviación del nitrato hacia las aguas subterráneas. Los niveles excesivos representan una amenaza para la salud pública
Aplicación de estiércol	Contaminación por agentes patógenos, metales, P y N	Contaminación por agentes patógenos, metales, P y N
Aplicación de plaguicidas	Disfunción del sistema ecológico por pérdida de los depredadores superiores debido a la inhibición del crecimiento y a los problemas reproductivos. Consecuencias negativas para la salud por consumo de pescado contaminado	Algunos plaguicidas pueden lixiviar en las aguas subterráneas, provocando problemas para la salud humana a través de los pozos contaminados
Cebaderos	Contaminación con agentes patógenos y metales pesados contenidos en orina y en heces	Posible lixiviación de nitrógeno y metales procedentes de purines
Riego	Escorrentía de sales, que da lugar a problemas de salinización. Escorrentía de fertilizantes y plaguicidas, produciendo bioacumulación en especies ícticas comestibles	Enriquecimiento del agua subterránea con sales y nutrientes, especialmente
Talas	Erosión de la tierra, lo que da lugar a un aumento de turbidez. Perturbación y cambio del régimen hidrológico, muchas veces con pérdida de cursos de agua	Perturbación del régimen hidrológico, con disminución de la alimentación de los acuíferos

Os adubos mais aplicados, segundo o estudo da autora, na parte da zona de regadio Almonte-Marismas são: 400 kg/ha/ano de ureia 46%, 400 kg/ha/ano de nitrato de amónio 33% e cerca de 600 a 800 kg/ha/ano de complexos N-P-K (0-14-14; 7-14-7; 9-8-27; 15-15-15; 8-15-15; 13-0-46, indicando cada valor percentagens em peso de N, P₂O₅ e K₂O que contém cada complexo fertilizante).

Iglesias (1999) faz uma estimativa para a quantidade de fertilizantes aplicada no cultivo de morangos, tendo em consideração os diferentes meios de transporte dos fertilizantes (Tabela 6.2). Sem entrar em detalhes, uma vez que esta informação se encontra descrita no seu trabalho, passa-se a apresentar uma breve síntese deste estudo.

Tabela. 6.2. Quantificação do azoto aplicado. Fonte: Iglesias (1999).

400 kg/ha/ano de ureia	46% da ureia é N	184 kg/ha/ano de N
400 kg/ha/ano de nitrato de amónio	33% do nitrato de amónio é N	132 kg/ha/ano de N
600-800 kg/ha/ano de complexos	Cujas quantidades de N não superam os 15%	90-120 kg/ha/ano de N
Total		406-436 kg/ha/ano de N

Os valores estimados são superiores aos recomendados na bibliografia (Iglesias, 1999).

Para um rendimento de 30 tn/ha, que é o valor que se obtém na zona (Custodio e Palancar, 1995), a dose de fertilizante aplicada habitualmente na agricultura espanhola para morangos é aproximadamente de 300 kg/ha/ano de N. Por cultivos, o do morango é o que recebe as maiores quantidades de fertilizantes (NO₃K: 13%; (NO₃)₂Ca: 15%; solução nítrica 20%; complexo 4-8-12), que quantifica cerca de 1000 tn/ano de nitrogénio para toda a superfície do aquífero destinada à plantação de morangos.

Quanto ao aporte de NO₃⁻ pela água da chuva, a presença de nitratos na chuva local é pouco relevante: os valores medidos rondam entre os 0 e 3 mg/L (Iglesias, 1999). Quanto à quantidade anual de nitratos aportados, consideram-se valores entre os 2,5 a 4,6 kg/ha/año (Iglesias, 1999). Segundo os resultados obtidos por este autor, trata-se de uma água com salinidade principalmente de origem marinha.

Outra fonte possível de NO₃⁻ seria a água de rega. Porém a água que se utiliza para regar, provém dos poços profundos da zona, os quais têm as zonas ranhuradas colocadas abaixo dos 45 m de profundidade. A água subterrânea a esta profundidade, como se explicará na secção 6.3, não contém nitratos. Portanto, a quantidade de N aportada pela chuva e pela água de rega pode considerar-se desprezável face à quantidade que entra sob a forma de fertilizantes (Iglesias, 1999).

Contudo, os poços que se encontram perto das zonas onde há extracção são afectados mais rapidamente, uma vez que com a bombagem o processo de mistura vertical é acelerado. Desta forma, as extracções que se realizam na zona contribuem para a dispersão da contaminação na zona saturada do aquífero.

A exploração dos poços agrícolas existentes na zona produz importantes descidas nos níveis piezométricos, que afectam principalmente os níveis profundos. Estas bombagens provocam alterações no fluxo natural que existe na área. Entre as consequências da bombagem intensiva, estão as inversões no sentido do fluxo

vertical. Ao longo do ribeiro de La Rocina, o sentido do fluxo foi alterado como consequência da extracção intensiva do aquífero, uma vez que muitas captações encontram-se concentradas nesta zona. Em condições de fluxo natural, esta tratava-se de uma zona de descarga, onde dominavam os fluxos ascendentes; nas condições actuais de regime influenciado continua a existir descarga de linhas de fluxo mais superficiais, mas algumas das linhas de fluxo profundas são agora descendentes (Custodio, 1994) (Fig. 6.2). A principal consequência disto é que as linhas de fluxo que descarregam em La Rocina só aportam água já contaminada por agroquímicos, ao haver uma diminuição da contribuição de águas limpas mais profundas.

A influência das bombagens no fluxo vertical afecta a maioria das sondagens estudadas neste trabalho.

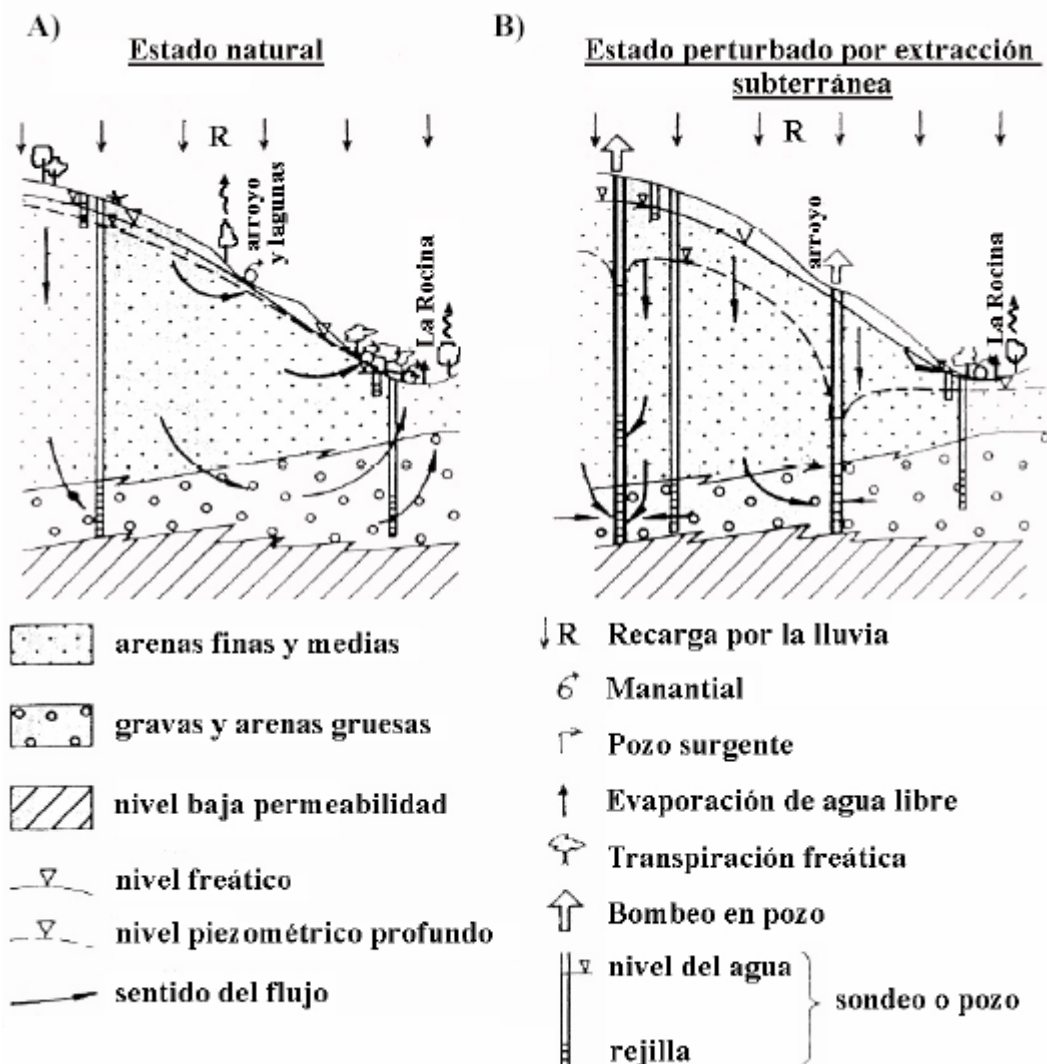


Fig. 6.2. Secção idealizada e simplificada da envolvente do ribeiro de La Rocina na qual se mostram e comparam as condições hidráulicas no estado natural (A) e no estado influenciado devido ao efeito das extracções de água subterrânea por bombagem (B) . Fonte: Custodio (1994).

6.2 SITUAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR NO_3^- EM 1999

Presença de NO_3^- na zona não saturada

Iglesias (1999) realizou uma amostragem pontual da zona não saturada em parcelas dedicadas ao cultivo de morangos, em concreto na propriedade de Floropán. A amostragem realizou-se perfurando com um martelo à percussão até alcançar o nível freático. Foram tomadas amostras a diferentes profundidades e em todas foram analisadas a percentagem de humidade em peso e as concentrações de nitrato (NO_3^-), amónio (NH_4^+) e no nitrito (NO_2^-). Tomando por densidade aparente do solo 1,7 kg/L, calculou-se a humidade volumétrica e quantidade de nitratos presentes na humidade do solo.

Na Fig. 6.3 encontram-se representados os perfis de humidade e presença de nitratos, em função da profundidade. Como se pode observar há teores de nitratos bastante elevados, que segundo a autora se devem a uma concentração produzida pelos processos de evaporação na parte mais superficial, já que os teores de humidade são bastante baixos. Neste perfil chegaram-se a medir concentrações pontuais de nitratos na humidade do solo de 3770 mg/L, na parte mais superficial do perfil. Este valor vai diminuindo ao longo do perfil até atingir os 146 mg/L.

As elevadas concentrações detectadas em profundidade, abaixo da profundidade radicular, demonstram que a quantidade de nitrogénio fornecida nos adubos foi superior às necessidades das plantas, produzindo um incremento na lavagem de nitratos. O total de nitratos acumulados nos perfis amostrados oscila entre os 30,6 e 52,7 g/m², que corresponde a 306 e 527 kg/ha de NO_3^- nos primeiros 1,9 m.

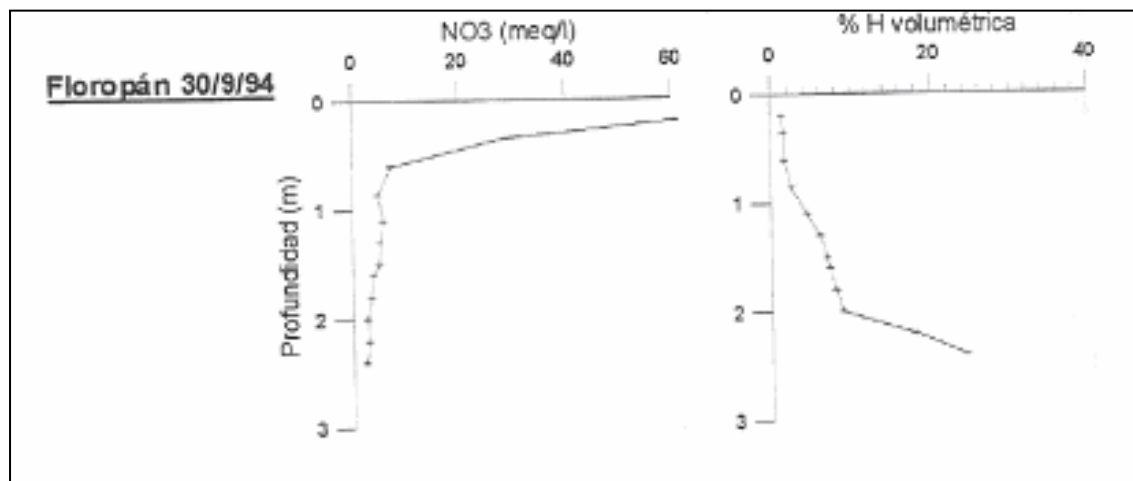


Fig.6.3 Perfis de concentrações de nitratos e humidade na zona não saturada. Fonte: Iglesias (1999).

Presença de NO_3^- nas águas subterrâneas

Aqui é utilizada como referência a perfuração projectada por Iglesias (1999) para o estudo do comportamento de contaminantes nos primeiros metros da zona saturada, já mencionada e descrita no Capítulo 2 (ver Fig. 2.1), realizada pela Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) sob supervisão da autora.

A sondagem foi perfurada na propriedade de El Tejar onde a actividade agrícola principal, e em concreto na localização deste furo, foi o cultivo de morangos até ao ano 2000. A partir desta data a actividade agrícola cessou.

Os dados que se comentam procedem de quatro amostragens realizadas por Iglesias (1999) entre 1995 e 1996 e duas amostragens realizadas (na mesma sondagem) em 2005 e 2006 pelo grupo de hidrogeologia da Universidade Politécnica de Cartagena (UPCT).

Realizaram-se cinco amostragens de água subterrânea a partir deste furo no decorrer dos anos 1995 a 1996. Das cinco amostragens a autora decidiu desprezar a amostra mais profunda da primeira amostragem, uma vez que apresentava valores de concentração anómalos, possivelmente fruto dos efeitos residuais da água de perfuração.

Na Fig. 6.4 estão representados os perfis de concentração de nitratos em relação à profundidade. Pode observar-se uma importante diminuição dos teores de nitratos a partir da superfície. Entre os 10 e 15 m observa-se uma grande variação nas concentrações de nitratos que oscilam entre os 20,5 e 59,5 mg/L. Em geral as concentrações obtidas aos 15 m são iguais ou ligeiramente inferiores às obtidas aos 10 m. A autora crê que estas concentrações se encontram diluídas, devido às fortes chuvas que ocorreram nos meses anteriores à amostragem.

Aos 18 m as concentrações mantêm-se relativamente constantes no tempo, apresentando valores próximos a 60 mg/L, excepto na amostragem realizada em Junho de 1996, na qual ocorreu uma importante diminuição da concentração. Iglesias aponta como possível causa para esta diminuição um encharcamento que favoreceu condições anaeróbias que produziram uma diminuição de nitratos.

A partir dos 22 m o teor de nitratos é praticamente nulo. Iglesias (1999) justifica esta diminuição de nitratos apresentando duas possíveis explicações: 1) pode estar associada à presença de um ambiente anóxico no qual se produz uma redução de nitratos, mas não pode comprovar esta possibilidade devido à falta de algumas determinações de campo, em concreto, de oxigénio dissolvido e presença de ferro (Fe); e 2) a frente de nitratos ainda não ter atingido esta profundidade. A autora apoia esta explicação com os teores de titrio presentes na água. Outro argumento a favor desta segunda explicação baseia-se no teor do ião cloreto, uma vez que o movimento do nitrato e do cloreto no solo ocorre de forma similar e, segundo resultados obtidos por Iglesias, os teores de cloreto também diminuem com a profundidade.

As duas amostragens realizadas dez anos mais tarde mostram uma alteração escassa ou mesmo nula, nas concentrações de NO_3^- em todas as profundidades. É importante assinalar que as amostras foram tomadas sempre tendo em conta o tempo de bombagem suficiente para renovar a água contida no furo e no terreno adjacente. A renovação foi controlada medindo o pH, a temperatura e CE durante a bombagem. A ausência de NO_3^- aos 21 m ainda na actualidade sugere a presença de condições redutoras a esta profundidade.

Na secção 6.3.1 é providenciada mais informação sobre a profundidade de afectação das águas com NO_3^- . Esta informação forma parte do trabalho realizado pelo autor desta tese.

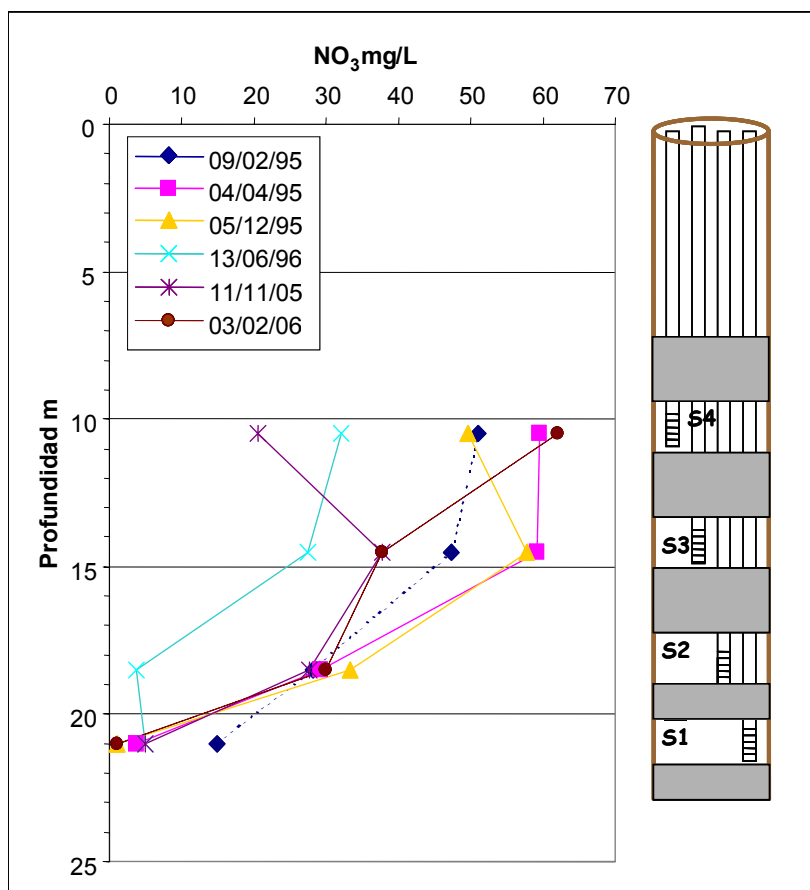


Fig. 6.4 Perfis de concentrações de nitratos nas águas subterrâneas amostradas na sondagem multitubo da propriedade El Tejar. Fonte: Manzano (comunicação pessoal).

6.3 ESTUDO DA EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA CONTAMINAÇÃO POR NO_3^- ENTRE 1991 E 2007

Na Fig. 6.5 mostra-se a localização de todas as sondagens das quais se dispõe de informação química histórica. Os pontos denominados C-X são conjuntos de sondagens nos quais costuma haver entre 2 a 4 sondagens perfuradas a diferentes profundidades e cada uma apresenta apenas uma zona de tubo ralo. A maioria dos pontos denominados SGOP-X são também conjuntos de sondagens, mas as denominações que vão de SGOP-30 a SGOP-50 são formadas por uma única sondagem. Os dados de profundidade total e localização do tubo ralo de cada sondagem em particular podem-se ver na Tabela 2 do Anexo 1.

O estudo da evolução temporal da concentração do NO_3^- é comentado na secção seguinte (6.3.1). Uma vez que o SO_4^{2-} costuma acompanhar o NO_3^- em muitos dos fertilizantes, também foi estudada a evolução do sulfato como apoio às conclusões obtidas com o estudo do nitrato.

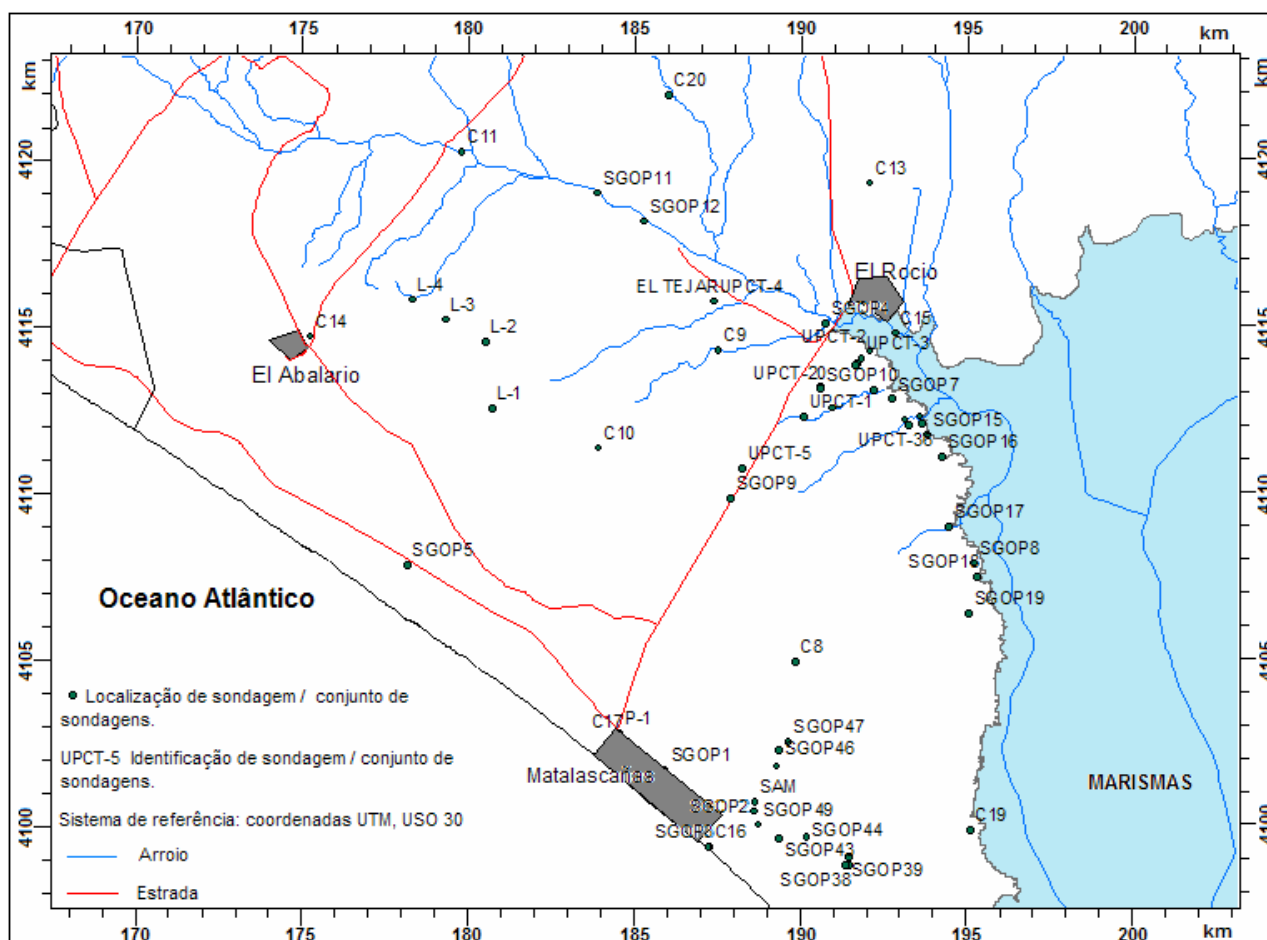


Fig. 6.5. Localização das sondagens estudadas das quais se dispõe a informação química histórica. Os dados de profundidade total e localização do tubo ralo de cada sondagem em particular encontram-se no Anexo 1.

6.3.1 EVOLUÇÃO TEMPORAL EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE NO_3^- E SO_4^{2-} NAS SONDAgens ESTUDADAS

Como já referido, os dados químicos utilizados correspondem ao período de 1991-2007. Contudo, há uma certa concentração das medições em duas épocas distintas, que estão relacionadas com a distribuição temporal dos projectos que permitiram estas amostragens: entre 1991 e 1997 (realizaram-se 153 análises ao abrigo de três projectos) e entre 1998 e 2007 (realizaram-se 207 análises ao abrigo de outros dois projectos).

Perante a desigual distribuição temporal dos dados e da impossibilidade de observar ano a ano a evolução das concentrações de NO_3^- e SO_4^{2-} , nesta secção decidiu-se comparar o conjunto dos valores medidos em cada um dos períodos referidos, em que os dados do primeiro grupo representariam, grosso modo, a situação do aquífero poucos anos depois de ser iniciada a actividade agrícola, enquanto os dados do segundo período representam a situação actual do aquífero, cerca de trinta anos após o início da actividade. A distribuição das concentrações de NO_3^- em relação à profundidade é mostrada na Fig. 6.6 a), b) e a distribuição das concentrações de SO_4^{2-} encontra-se na Fig. 6.7 a), b).

As sondagens mais profundas da série SGOP e C perfuraram-se entre 1990 e 1995. Para a perfuração foi sempre utilizada água dos poços de abastecimento agrícola, sendo esta água de proveniência pouco profunda e do poço que se encontrava mais perto. A água usada para perfurar introduziu nitratos e sulfatos no terreno. Como na zona estudada o aquífero apresenta uma permeabilidade mediana, e o diâmetro das sondagens não permite realizar uma limpeza intensa, a presença de restos de água de perfuração no meio foi observada durante muitos anos. Esta água ainda existe nas zonas mais afastadas da actividade agrícola, onde não se bomba e o fluxo natural é insuficiente para diluir os restos da água de perfuração. Esta situação é comentada nos parágrafos seguintes.

As sondagens da série UPCT foram perfuradas à mão sem usar água (ver Fig. 4.3), por tanto permitem obter informação acerca da composição da água de recarga em cada zona.

Evolução da distribuição de NO_3^-

- Período 1991-1997

Como se pode observar na Fig. 6.6 a), a amplitude de concentrações de NO_3^- oscila entre zero e 60 mg/L. Os valores mais elevados de concentrações, salvo algumas excepções, concentram-se nos níveis mais superficiais, até aos 25 m. Estes níveis apresentam, também, elevada dispersão. Mas aos 45 m ainda se pode observar uma certa dispersão das concentrações.

A partir dos 50 m há uma redução substancial nas concentrações dos nitratos, os valores não excedem os 7 mg/L, apresentando-se bastante homogéneos, salvo alguns casos pontuais. A partir desta profundidade a dispersão é praticamente nula.

De um modo geral pode-se constatar que, quer as concentrações, quer a dispersão, diminuem substancialmente à medida que se avança em profundidade.

- Período 1998-2007

Como se pode verificar, na Fig. 6.6 b), o intervalo de concentrações oscila entre os zero e 75 mg/L. Os valores mais elevados de concentração encontram-se, também, nos níveis mais superficiais até aos 25 m, nos quais a dispersão se apresenta bastante elevada. Ainda que a dispersão seja elevada a maioria dos valores são inferiores a 10 mg/L.

A partir dos 25 m de profundidade dá-se uma brusca redução nos valores de concentração, que a partir desta profundidade não ultrapassam os 7-10 mg/L (a maioria), apresentando um comportamento bastante uniforme. Estas concentrações apresentam a mesma ordem de grandeza que os aportes das águas da chuva uma vez concentrados por evapotranspiração.

Ao compararmos os gráficos dos dois períodos, além do aumento da densidade de pontos no período 1998-2007 devido à recente implementação, por parte da UPCT, de novas sondagens piezométricas manuais para o estudo das águas de recarga, não existem grandes diferenças até aos 40 m. Entre os 40 e 50 m destacam-se algumas sondagens nas quais houve uma descida nas concentrações de nitrato entre o primeiro e

o segundo período. Ao analisar com mais atenção os respectivos gráficos de evolução temporal (Anexo 2), atribuem-se estas reduções à limpeza da água de perfuração utilizada na realização destas, a qual vai sendo limpa pelo fluxo natural existente na zona.

Por tanto, a principal informação que esta figura fornece é que as águas com NO_3 agrícola parecem encontrar-se perto dos 30 m de profundidade. Considerando que a agricultura intensiva começou no ano de 1980, isto representa uma deslocação vertical das águas dos excedentes de rega de cerca de 1 m/ano. E para este deslocamento contribuiu, sem dúvida, o aumento do gradiente hidráulico vertical devido às bombagens, que se encontram abaixo dos 40 m.

Também se pode observar um certo efeito de limpeza da água de perfuração, principalmente nas sondagens que se encontram a maior profundidade.

Evolução da distribuição de SO_4^{2-}

Como se pode observar na Fig. 6.7 a) e b), as amplitudes de concentrações medidas de SO_4^{2-} em ambos períodos são similares. Os valores máximos encontram-se à volta dos 80 mg/L e correspondem às águas menos profundas. No período 1998-2007 há mais medições de águas freáticas (<5 m), que correspondem às sondagens UPCT.

Não há uma evolução importante de 1991-97 para 1998-07. O efeito de limpeza da água de perfuração, que é bastante mais evidente no caso do nitrato, não é tão claro no sulfato. Dado que em meios naturais onde existem condições redox o NO_3^- é reduzido antes do SO_4^{2-} , isto pode indicar que a diminuição observada para o NO_3^- deve-se na realidade à combinação diluição mais redução.

Mas ao analisar mais atentamente a evolução temporal de algumas sondagens, em concreto C10-S21, SGOP4-S2, SGOP4-S3, tudo indica que os valores de sulfato observados nestes pontos se devem a diferentes tempos de bombagem, ou seja, limpeza insuficiente antes da amostragem. Esta hipótese justifica a evolução temporal deste elemento nas sondagens em questão e o seu diferente comportamento em relação às restantes sondagens.

Apesar de não terem continuidade temporal (isto é, não há dados de amostragens realizadas no período mais recente, 1998-07), as sondagens C16-S40 e SGOP2-S4 apresentam valores de concentrações bastante elevados para a profundidade a que se encontram. Posto que se encontram fora da zona agrícola, os valores elevados que se observam podem atribuir-se à água de perfuração.

Uma vez explicado o comportamento destas sondagens, ao analisar de novo o gráfico de profundidade Vs concentração de sulfato, verifica-se que o seu comportamento global é bastante semelhante ao do nitrato, havendo também uma tendência clara de redução na grandeza e dispersão das concentrações deste parâmetro com a profundidade.

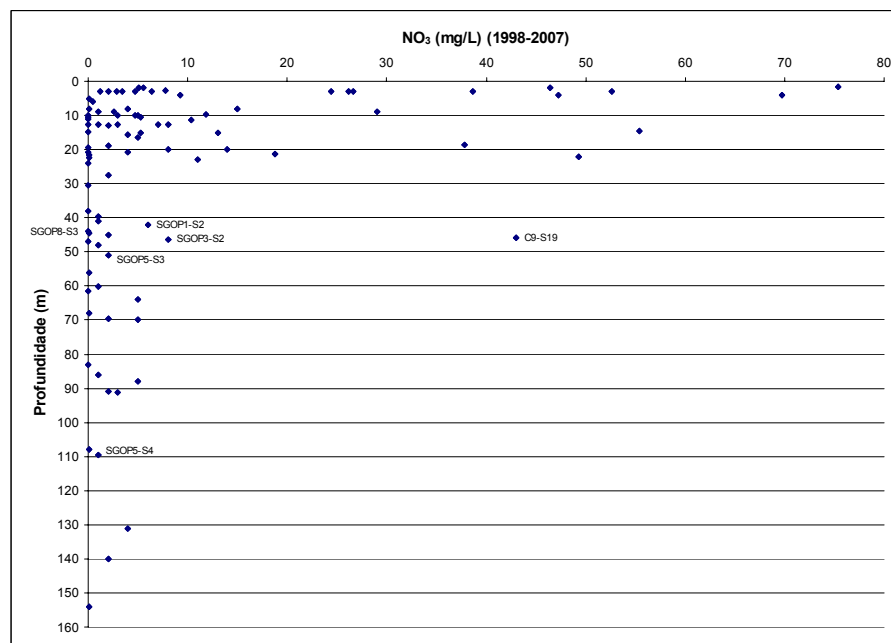
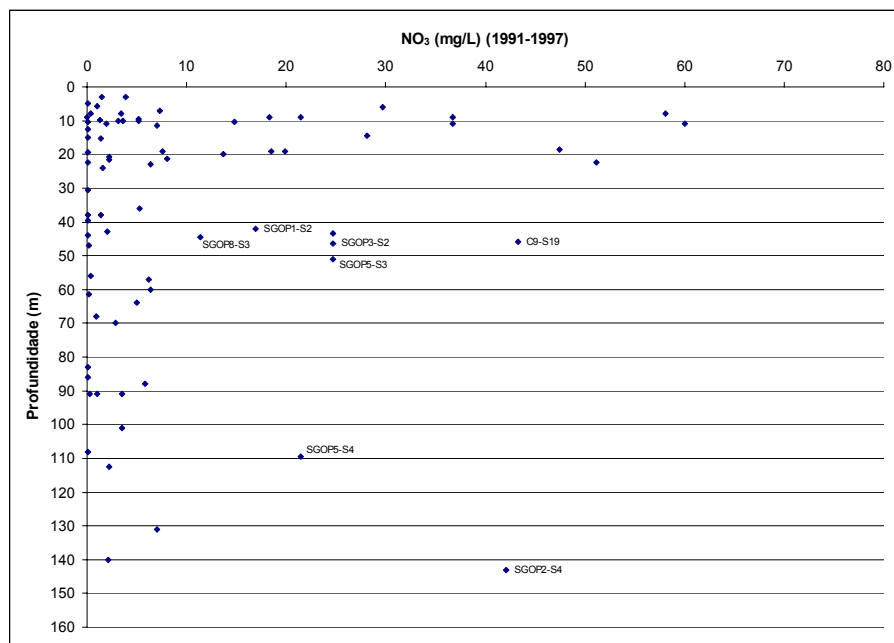


Figura 6.6 a) Evolução temporal em função da profundidade de NO₃⁻ nas sondagens estudadas entre 1991 e 1997. b) Evolução temporal em função da profundidade de NO₃⁻ nas sondagens estudadas entre 1998 e 2007.

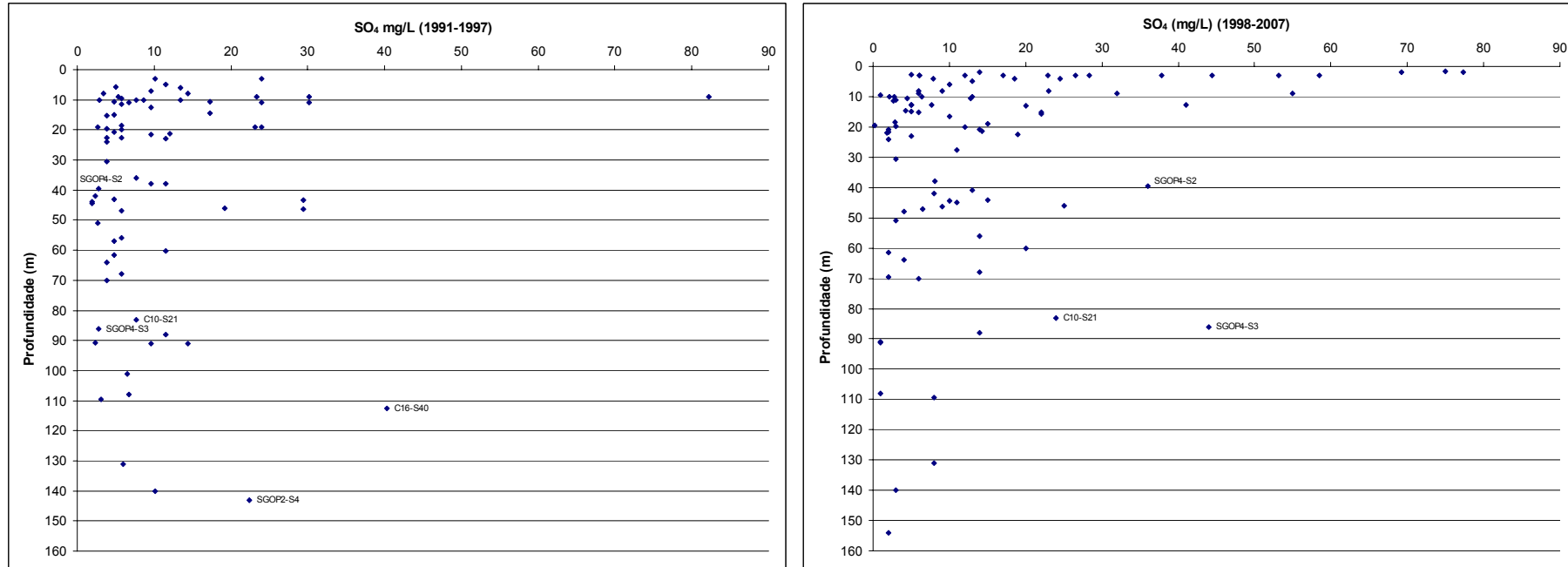


Figura 6.7 a) Evolução temporal em função da profundidade de SO_4^{2-} nas sondagens estudadas entre 1991 e 1997. b) Evolução temporal em função da profundidade de SO_4^{2-} nas sondagens estudadas entre 1998 e 2007.

6.3.2 EVOLUÇÃO TEMPORAL DE NO_3^- NAS SONDAGENS ESTUDADAS

Para o estudo da evolução temporal de nitratos nas sondagens estudadas foram construídos gráficos (ver Anexo 2) que mostram o comportamento dos nitratos ao longo do tempo (1991-2007) para cada uma das sondagens estudadas. Neste capítulo não se comentará a evolução de todas as sondagens, mas sim de um pequeno grupo que é representativo do comportamento do conjunto de dados estudado.

Na Tabela 6.3 resume-se a tendência temporal observada dos nitratos e sulfatos em todas as sondagens. Aquando da elaboração da tabela, teve-se o cuidado de ser o mais sucinto possível, apresentando nesta apenas os intervalos nos quais se enquadram as concentrações de nitrato e sulfato em cada sondagem. No caso da sondagem apresentar uma tendência clara, ou alteração significativa, é feito um breve comentário no qual se expõe uma possível explicação para o ocorrido, em função do conhecimento que existe sobre a história da sondagem e da sua localização em relação aos campos de cultivo e à rede de fluxo de água subterrânea.

Evolução da concentração de NO_3^- em sondagens representativas

- Na sondagem L-2 (ralo: 7-9 m) o valor de concentração de sulfatos encontra-se entre os 5 e 10 mg/L (Fig. 6.8). Esta sondagem encontra-se numa zona onde nunca houve actividade agrícola (ver Fig. 6.5), a Oeste dos campos de cultivo. E além disto, o fluxo de água subterrânea vai desde a zona onde se encontra esta sondagem para Este. Portanto, esta amplitude de valores representaria a água de recarga local (água da chuva, um pouco concentrada devido à evapotranspiração).

- Na sondagem C10-S23 (ralo: 6-10 m) não há nenhuma tendência clara de evolução, mas surgem valores bastante elevados, quer por parte dos nitratos, quer por parte dos sulfatos. O nitrato apresenta uma amplitude de valores que oscila entre os 2 e 60 mg/L e o sulfato entre 14 e 67 mg/L. Estes valores podem dever-se ao facto de esta sondagem ser bastante superficial e, como já foi dito, é a zona mais afectada. A variação que se observa pode ser devida a épocas de maior e menor recarga, havendo deste modo uma maior e menor diluição, respectivamente.

- Na sondagem C13-S36 (ralo: 17-21 m) que se encontra numa zona agrícola, a Norte de El Rocío (ver Fig. 6.5), pode-se observar uma tendência bastante clara de aumento no nitrato e de diminuição no sulfato. O aumento de NO_3^- é facilmente explicado pela chegada da frente de contaminação agrícola, mas a diminuição de SO_4 não é tão facilmente explicável, uma vez que a diluição pelo fluxo natural do aquífero deveria afectar por igual a ambos componentes. Por sua vez a sondagem C13-S30, que se encontra junto à anterior, mas é mais profunda (ralo: 36-40 m), mostra um comportamento oposto a esta. Porém seria necessário dispor de mais amostras para confirmar a evolução de ambas.

- As sondagens do conjunto C19 encontram-se situadas fora da zona agrícola, a Este desta, no contacto com a marinha e são representativas das águas mais afastadas da fonte agrícola. Nenhuma delas contém NO_3^- , mas a maioria apresenta valores entre 10 e 20 mg/L de SO_4^{2-} desde que se construíram (em 1994) até à última amostragem disponível (2003) (Fig. 6.8). Quase todas perfuram camadas de argilas que lhes proporcionam confinamento e ambiente redutor. Esta seria a causa da ausência de NO_3^- , enquanto que o SO_4^{2-} (procedente da água de perfuração) ainda não se tinha reduzido por completo em 2003.

Tabela 6.3. Resumo das tendências de evolução temporal de cada sondagem.

Nome	Concentração NO ₃			Concentração SO ₄			Observações
	Aumenta	Diminui	S/alterações	Aumenta	Diminui	S/alterações	
C8-S16			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 5 - 20 mg/L
C8-S17			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 5 - 20 mg/L
C9-S19			x			x	NO ₃ : 40 - 50 mg/L SO ₄ : 20 - 25 mg/L
C9-S20			x			x	NO ₃ : 60 - 65 mg/L; SO ₄ : 20 - 25 mg/L
C10-S21			x	x			NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 6 - 35 mg/L. Aumento de S duvidoso, limpeza insuficiente antes da amostragem
C10-S22			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 15 mg/L
C10-S23			x			x	NO ₃ : 2 - 60; SO ₄ : 14 - 67. Limpeza insuficiente antes da amostragem
C10-S24			x		x		NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L. Diminuição de S duvidosa.
C11-S25			x			x	NO ₃ : 5 - 10 mg/L SO ₄ : 5 - 10 mg/L
C11-S26			x			x	NO ₃ : 5 - 10 mg/L SO ₄ : 5 - 10 mg/L
C11-S28			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 25 - 60 mg/L
C13-S30			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 10 - 25 mg/L
C13-S36	x				x		NO ₃ : 18 - 60 mg/L SO ₄ : 14 - 25 mg/L
C14-S32			x			x	NO ₃ : 5 - 10 mg/L SO ₄ : 5 - 15 mg/L
C14-S33			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
C14-S34			x			x	NO ₃ : 10 - 15 mg/L SO ₄ : 5 - 30 mg/L
C15-S37			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 5 mg/L
C16-S40			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 5 - 40 mg/L. Limpeza insuficiente antes da amostragem
C17-S42			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 5 mg/L
C17-S43			x			x	NO ₃ : 7 - 20 mg/L SO ₄ : 15 - 25 mg/L
C19-S49			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
C19-S50			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 4 - 20 mg/L. Limpeza insuficiente antes da amostragem
C19-S51			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 25 mg/L
C19-S52			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 20 mg/L
C20-S46			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
EL TEJAR S-1			x			x	NO ₃ : 0 - 15 mg/L SO ₄ : 5 - 20 mg/L
EL TEJAR S-2	x					x	NO ₃ : 5 - 55 mg/L SO ₄ : 0 - 20 mg/L
EL TEJAR S-3			x			x	NO ₃ : 25 - 60 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
EL TEJAR S-4			x			x	NO ₃ : 20 - 60 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
L-1			x			x	NO ₃ : 0 - 10 mg/L SO ₄ : 5 - 15 mg/L
L-2			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 5 - 10 mg/L. Um valor de 221 mg/L SO ₄ possivelmente devido à água de perfuração
L-3			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 20 mg/L
L-4A			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 20 mg/L. Oscilação devida à variabilidade da recarga (lúvia)
L-4B			x			x	NO ₃ : 0 - 10 mg/L SO ₄ : 5 - 15 mg/L. Oscilação devida à variabilidade da recarga (lúvia)
P-1			x			x	NO ₃ : 0 - 10 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L. Mistura de água de vários níveis
SGOP1-S1			x			x	NO ₃ : 20 - 80 mg/L SO ₄ : 55 - 80 mg/L. Um valor de 300 mg/L SO ₄ possivelmente devido à água de perfuração
SGOP1-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 15 mg/L SO ₄ : 0 - 70 mg/L
SGOP1-S3			x			x	NO ₃ : 0 - 10 mg/L SO ₄ : 0 - 20 mg/L. Maioria dos valores < 10 mg/L
SGOP1-S4			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP2-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 50 mg/L SO ₄ : 20 - 35 mg/L. Diminuição possivelmente devido à limpeza da água de perfuração
SGOP2-S2			x			x	NO ₃ : 5 - 25 mg/L SO ₄ : 0 - 30 mg/L. Diminuição possivelmente devido à limpeza da água de perfuração
SGOP2-S3			x			x	NO ₃ : 0 - 10 mg/L SO ₄ : 0 - 15 mg/L
SGOP2-S4			x			x	NO ₃ : 0 - 45 mg/L SO ₄ : 0 - 25 mg/L. Diminuição possivelmente devido à limpeza da água de perfuração
SGOP3-S1		x		x			NO ₃ : 25 - 50 mg/L SO ₄ : 30 - 70 mg/L
SGOP3-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 25 mg/L SO ₄ : 0 - 30 mg/L. Diminuição possivelmente devido à limpeza da água de perfuração
SGOP4-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 20 mg/L SO ₄ : 5 - 30 mg/L. Diminuição possivelmente devido à limpeza da água de perfuração
SGOP4-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 35 mg/L. Limpeza insuficiente antes da amostragem em 2001
SGOP4-S3			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 45 mg/L. Limpeza insuficiente antes da amostragem em 2001
SGOP5-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 30 mg/L SO ₄ : 10 - 30 mg/L. Diminuição possivelmente devido à limpeza da água de perfuração
SGOP5-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 20 mg/L SO ₄ : 0 - 15 mg/L. Diminuição possivelmente devido à limpeza da água de perfuração
SGOP5-S3			x			x	NO ₃ : 0 - 25 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L. Diminuição possivelmente devido à limpeza da água de perfuração
SGOP5-S4			x			x	NO ₃ : 0 - 20 mg/L SO ₄ : 5 - 15 mg/L. Diminuição possivelmente devido à limpeza da água de perfuração
SGOP7-S1			x			x	NO ₃ : 5 - 10 mg/L SO ₄ : 0 - 5 mg/L
SGOP7-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 5 - 10 mg/L
SGOP8-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 5 - 10 mg/L
SGOP8-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 1 - 10 mg/L
SGOP8-S3			x			x	NO ₃ : 0 - 10 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP9-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 15 mg/L SO ₄ : 5 - 20 mg/L
SGOP9-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 5 - 20 mg/L
SGOP9-S3			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP10-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP10-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 5 - 10 mg/L
SGOP10-S3			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP11-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 5 - 15 mg/L
SGOP11-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 15 mg/L. Maioria dos valores < 10 mg/L
SGOP11-S3			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 5 mg/L
SGOP12-S1	x					x	NO ₃ : 0 - 25 mg/L SO ₄ : 5 - 15 mg/L. Aumenta um pouco nas últimas amostragens
SGOP12-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP15-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP15-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP16-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 5 - 10 mg/L
SGOP17-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 20 mg/L. Maioria dos valores < 10 mg/L
SGOP17-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 10 mg/L SO ₄ : 0 - 15 mg/L. Maioria dos valores < 10 mg/L
SGOP18-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP18-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 5 mg/L
SGOP19-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP19-S2			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L SO ₄ : 5 - 15 mg/L

Tabela 6.3. (cont.). Resumo das tendências de evolução temporal de cada sondagem.

Nombre	Concentración NO ₃			Concentración SO ₄			Observaciones
	Aumenta	Disminuye	Sin cambios	Aumenta	Disminuye	Sin cambios	
SGOP38-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 0 - 20 mg/L. Maioria dos valores < 10 mg/L
SGOP39-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 10 mg/L. SO ₄ : 0 - 5 mg/L
SGOP43-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 15 - 45 mg/L. Devido à acumulação de SO ₄ no humedal
SGOP44-S1			x		x		NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 5 - 20 mg/L
SGOP45-S1			x			x	NO ₃ : 5 - 10 mg/L. SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP46-S1			x			x	NO ₃ : 5 - 10 mg/L. SO ₄ : 10 - 15 mg/L
SGOP47-S1			x			x	NO ₃ : 10 - 15 mg/L. SO ₄ : 0 - 10 mg/L
SGOP48-S1			x			x	NO ₃ : 0 - 10 mg/L. SO ₄ : 10 - 20 mg/L. Oscilação devida a mudanças no regimen da laguna
SGOP49-S1			x			x	NO ₃ : 5 - 30 mg/L. SO ₄ : 80 - 400 mg/L. Oscilação devida a mudanças no regimen da laguna
IGOLALLA1			x		x		NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 10 - 50 mg/L. Diminuição possivelmente devido a limpeza da água de perfuração
IGOLALLA2-AZ			x		x		NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 10 - 35 mg/L. Diminuição possivelmente devido a limpeza da água de perfuração
IGOLALLA2-AM			x			x	NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 40 - 45 mg/L
SAM-S1			x		x		NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 15 - 75 mg/L. Limpeza insuficiente antes da amostragem
SAM-S2			x		x		NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 15 - 50 mg/L. Limpeza insuficiente antes da amostragem
UPCT-1			x			x	NO ₃ : 5 - 20 mg/L. SO ₄ : 5 - 10 mg/L
UPCT-2		x		x			NO ₃ : 5 - 20 mg/L. SO ₄ : 15 - 25 mg/L. Oscilação devida à variabilidade da recarga (fluvia)
UPCT-3			x	x			NO ₃ : 5 - 10 mg/L. SO ₄ : 15 - 40 mg/L. Oscilação devida à variabilidade da recarga (fluvia)
UPCT-4	x					x	NO ₃ : 0 - 45 mg/L. SO ₄ : 10 - 15 mg/L
UPCT-5		x				x	NO ₃ : 75 - 200 mg/L. SO ₄ : 75 - 85 mg/L
UPCT-10			x	x			NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 50 - 70 mg/L
UPCT-17	x				x		NO ₃ : 0 - 40 mg/L. SO ₄ : 55 - 95 mg/L
UPCT-18			x	x			NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 25 - 80 mg/L
UPCT-19			x		x		NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 25 - 60 mg/L
UPCT-20	x				x		NO ₃ : 0 - 200 mg/L. SO ₄ : 60 - 100 mg/L
UPCT-21	x				x		NO ₃ : 0 - 5 mg/L. SO ₄ : 45 - 50 mg/L
UPCT-22	x					x	NO ₃ : 15 - 25 mg/L. SO ₄ : 0 - 5 mg/L
UPCT-23		x			x		NO ₃ : 25 - 35 mg/L. SO ₄ : 35 - 55 mg/L
UPCT-24	x				x		NO ₃ : 0 - 25 mg/L. SO ₄ : 25 - 45 mg/L
UPCT-32			x			x	NO ₃ : 5 - 10 mg/L. SO ₄ : 5 - 10 mg/L
UPCT-33	x				x		NO ₃ : 35 - 50 mg/L. SO ₄ : 10 - 20 mg/L
UPCT-35	x					x	NO ₃ : 40 - 50 mg/L. SO ₄ : 15 - 20 mg/L
UPCT-36	x				x		NO ₃ : 65 - 70 mg/L. SO ₄ : 0 - 10 mg/L

- As sondagens do conjunto SGOP1 encontram-se numa zona urbana, não agrícola. Nos furos mais curtos (S1, ralo: 8-10 m) ainda existiam vestígios da água de perfuração em 1999, enquanto que nos mais profundos (S2, S3 e S4) já não. Isto pode-se dever à maior permeabilidade (e maior efeito de diluição) dos níveis mais profundos.

- O mesmo se pode observar nas sondagens dos conjuntos SGOP2 e SGOP3 (SGOP2-S1, ralo: 10-12 m; SGOP2-S2, ralo: 41-45,6 m; SGOP2-S4; ralo: 140-146 m; SGOP3-S2, ralo: 44-48,7 m). Nenhuma destas sondagens se encontra em zona agrícola. Tendo em conta a evolução destas com o tempo, tudo indica que a diminuição nas concentrações do nitrato e sulfato se deva à diluição da água de perfuração no aquífero.

- As sondagens SGOP4-S1 (ralo: 8-10 m), SGOP4-S2 (ralo: 36,6-42,6 m) e SGOP4-S3 (ralo: 83-89 m) também não se encontram na zona agrícola. Nos gráficos de evolução temporal dos sulfatos regista-se um forte aumento (SO₄²⁻ > 30 mg/L) na amostragem de 2001 para as três sondagens. Não há dados posteriores para as duas mais profundas mas sim para a mais curta, que nas seguintes amostragens volta a ter concentrações inferiores a 10 mg/L. A hipótese mais provável para explicar este comportamento é que em 2001 as sondagens ficaram submersas (o ribeiro de La Rocina está a escassos metros) entrando água fluvial para a tubagem.

- Na sondagem SGOP12-S1 (ralo: 18,5-24,1 m) o gráfico de evolução temporal do nitrato apresenta um aumento nas últimas campanhas. A concentração de sulfato não mostra alterações temporais significativas mas supera, em geral, os 10 mg/L. Esta sondagem situa-se na margem direita do ribeiro de La Rocina, na zona de descarga, cujas linhas de fluxo da água subterrânea são procedentes do sector mais ocidental da zona agrícola. Tratar-se-ia, por tanto, de água com conteúdo de excedentes de rega.

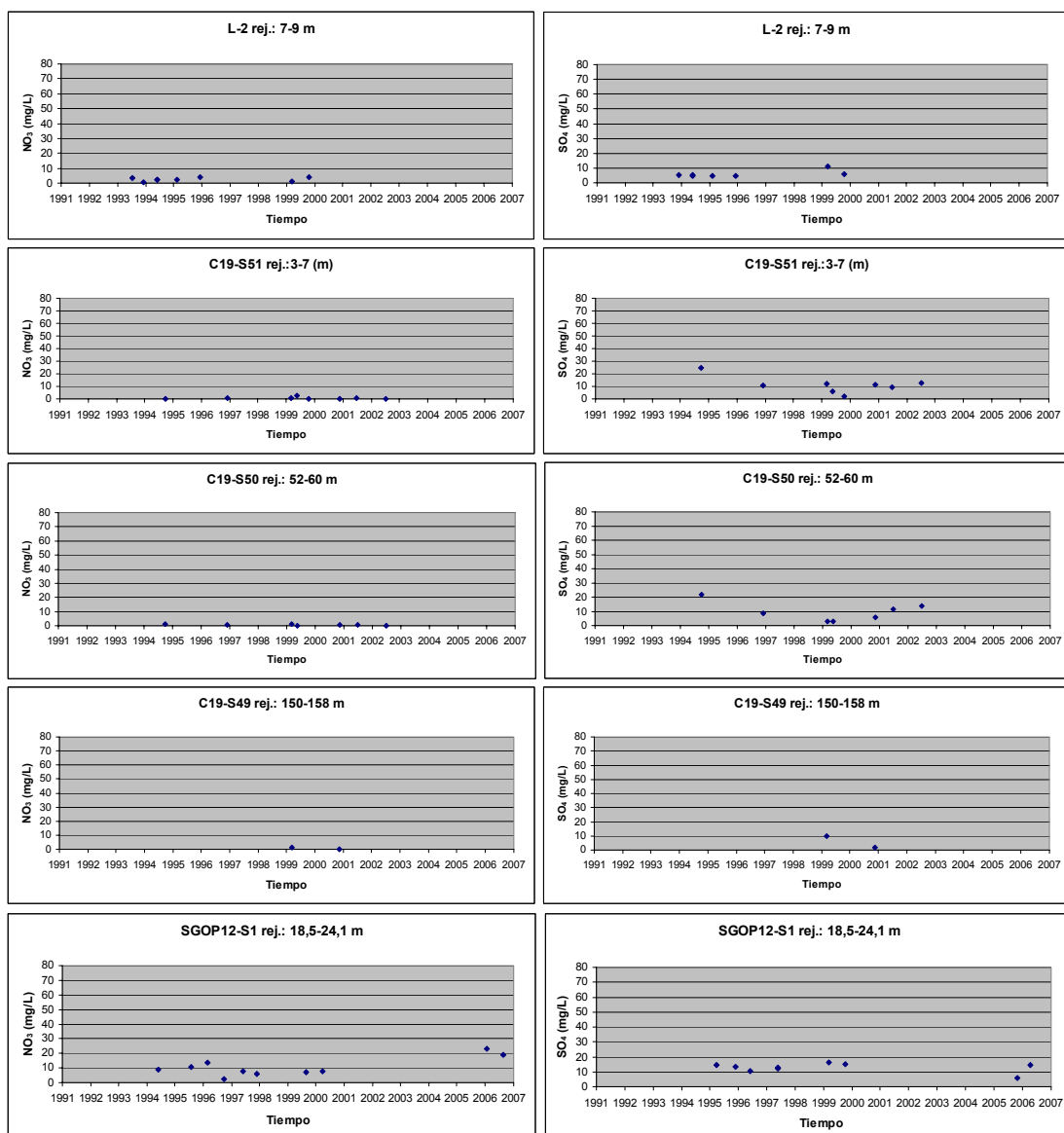


Fig. 6.8. Alguns exemplos da evolução temporal de NO_3^- e SO_4^{2-} comentados no texto.

- As sondagens SGOP38-S1, SGOP43-S1, SGOP44-S1, SGOP46-S1, SGOP48-S1 e SGOP49-S1, todas elas ranhuradas entre os 11 e 18 m, apresentam um comportamento similar: mostram uma concentração de sulfatos maior que o existente na água da chuva ($> 10 \text{ mg/L}$) que varia de um ano para o outro. Estas sondagens encontram-se junto a lagunas temporárias que originalmente eram de origem freática, mas hoje em dia estão desconectadas do aquífero quase o ano inteiro, devido à exploração intensiva da água subterrânea. Esta situação converteu estas lagunas em áreas de acumulação de sulfuretos nos sedimentos do fundo lagunar. Durante a época seca há precipitação de sais sulfurados e de sulfuretos metálicos. Durante a época húmida a chuva dissolve e oxida parte destes sulfuretos, incorporando-os à água superficial e subterrânea como sulfatos (Manzano et al., 2007).

- Nas sondagens IGOLALLA1 (ralo: 67-72m) e IGOLALLA2-AZ (ralo: 44-46m) há uma diminuição de sulfato que possivelmente se deverá à diluição da água de perfuração pelo fluxo natural do aquífero. Ambas se encontram dentro do Parque Nacional, bastante afastadas da zona agrícola.

- Como já referido, as sondagens da série UPCT foram perfuradas manualmente, sem usar água. Algumas delas situam-se em zona agrícola ou junto a drenagens agrícolas, e têm concentrações de nitrato e sulfato na ordem das várias dezenas de mg/L. As que não se encontram em zona agrícola apresentam valores <10 mg/L de nitrato e de sulfato, que coincide com o transportado pela água da chuva e matéria orgânica do solo. Estas sondagens dão informação sobre as características da água recém incorporada na zona saturada, e a evolução temporal da composição da água em cada uma das sondagens deve-se às alterações no regime de recarga (na quantidade de água e na sua qualidade), quer pela água da chuva, quer pela água de rega.

6.3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE NO_3^- A DIFERENTES PROFUNDIDADES

Para apoiar o estudo da evolução temporal do avanço da contaminação agrícola em função da profundidade, realizou-se um estudo estatístico das concentrações de NO_3^- para diferentes intervalos de profundidade e para os dois períodos históricos com mais dados disponíveis (1991-1997 e 1998-2007).

Na Tabela 6.4 encontram-se resumidos os resultados obtidos do cálculo das medidas de tendência central (média e mediana) e dos percentis 2,3; 25; 75; 97,7 e o número de medições. Estes dados dizem respeito a cada intervalo de profundidade e respectivo período. Nesta análise estatística apenas se utilizaram os dados das sondagens cujo filtro se enquadrava nos intervalos de profundidade definidos.

Os mesmos dados encontram-se representados nos diagramas de extremos e quartis da Fig. 6.9. No diagrama podem-se ver representados, delimitando esta, os percentis 25 e 75 do conjunto de dados (também denominados, respectivamente, quartil inferior e superior). E dentro da caixa encontra-se representada a mediana (percentil 50). Os “bigodes” representam a amplitude dos dados, ajustada para o percentil 2,3 e 97,7, com propósito de incluir a maioria das observações.

As interpretações devem ser tomadas com precaução, uma vez que o número de observações é bastante variável em cada uma das épocas e para as diferentes profundidades, o que poderá “sugerir” evoluções que não se devam a processos reais.

Tabela 6.4. Resumo dos parâmetros estatísticos analisados

Profundidade (m)	0--5		5--15		15--30		30--45	
Período (anos)	91/97	98/07	91/97	98/07	91/97	98/07	91/97	98/07
Média (NO ₃ mg/L)	3.40	23.70	11.90	5.90	17.40	8.70	8.20	3.50
Mediana (NO ₃ mg/L)	3.90	6.70	2.70	3.38	10.50	4.00	2.50	1.00
Percentil 2.3 (NO ₃ mg/L)	0.02	0.00	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00
Percentil 25 (NO ₃ mg/L)	0.40	1.40	0.63	1.00	2.20	1.00	0.33	0.10
Percentil 75 (NO ₃ mg/L)	4.10	26.49	17.42	6.50	25.67	12.00	9.75	2.00
Percentil 97.7 (NO ₃ mg/L)	9.51	188.19	61.94	31.44	59.22	55.69	30.11	26.10
Nº medições	9	50	70	79	42	56	32	22

Tendo em conta esta precaução, a observação da Fig. 6.9 e da Tabela 6.4 sugere a seguinte evolução para cada período de amostragem:

Ressalta em primeiro lugar, o facto da tendência no período de 1991-1997 ser positiva, isto é os valores da mediana e dos percentis 25 e 75 vão aumentando até ao intervalo 15-30 m, a partir deste tornam a descer. Isto não é coerente com o modelo conceptual do funcionamento do aquífero: a tendência deveria ser negativa já que os contaminantes se deslocam desde o solo para níveis mais profundos, através do fluxo vertical descendente que domina na maior parte do aquífero. Porém também não se pode atribuir esta causa à distribuição espacial das sondagens em relação às fontes de contaminação, já que as sondagens com ralo entre os 5 e 15 m e as sondagens com ralo entre os 15 e 30 m costumam estar juntas. Ter-se-ia que procurar uma causa que não é de todo evidente.

No período 1998-07 a tendência é menos clara. Neste caso as maiores concentrações encontram-se no sítio esperado, nas águas mais superficiais (entre os 0 e 5 m de profundidade), seguramente devido ao maior número de observações neste intervalo relativamente ao período anterior. Por exemplo, incluem-se as amostras das sondagens manuais da série UPCT, que não existiam antes de 2005. Porém, a partir deste nível a evolução é similar ao do período 1991-1997, se bem que a distribuição das concentrações para cada intervalo de profundidade apresentam menor dispersão no período mais recente do que no período mais antigo. Além disto, o valor do quartil 75 é menor para todos os intervalos de profundidade nas amostras mais recentes. Este comportamento poderia estar a indicar a existência de processos de redução praticamente em toda a zona saturada do aquífero.

Uma descrição mais detalhada das alterações que se observam para cada intervalo de profundidade entre os dois períodos de amostragem, permite constatar:

- Entre os 0 e 5 m de profundidade: trata-se de águas freáticas. O valor da mediana, dos quartis e do percentil 97,7 aumenta extraordinariamente no período mais recente em relação ao mais antigo. Muito provavelmente, deve-se à diferença existente entre o número de observações do período mais recente (50) e o mais antigo (9). Porém, interpretando os valores correspondentes ao período mais recente, (1998-2007), verifica-se que metade das amostras (mediana) têm uma concentração explicada apenas pela contribuição da chuva (6,7 mg/L), mas ao considerar-se 75 % das amostras vê-se claramente que existe um contributo do nitrato agrícola (26 mg/L). Existem até amostras com concentrações a rondar os 200 mg/L. Portanto, a contaminação agrícola das águas freáticas é clara.

- Entre os 5 e 15 m de profundidade: o número de observações realizadas em ambos os períodos é similar (70 e 79, respectivamente), pelo que as deduções são mais fiáveis. Apesar dos valores da mediana e do quartil 25 aumentarem ligeiramente com o tempo, os do quartil 75 e do percentil 97,7 diminuem também claramente. Isto é, há uma diminuição na amplitude de variação das concentrações, mas os valores de mais de metade dos dados mantêm-se perto dos 4 mg/L (3,38 mg/L). Os dados mais recentes indicam que 75% das amostras estão abaixo dos 6,5 mg/L, e apenas 2,3 por cento tem mais de 30 mg/L.

- Entre os 15 e 30 m de profundidade: o número de observações realizadas nos dois períodos é razoavelmente similar (42 e 56, respectivamente). O valor da mediana diminui de 10,5 para 4 mg/L, e também diminuem os valores dos quartis 25 e 75 e do percentil 97,7. Os dados mais recentes indicam que 75% apresentam menos de 12 mg/L e 2,3% têm mais de 50 mg/L.

- Entre os 30 e 45 m de profundidade: o número de observações realizadas em ambos os períodos é também razoavelmente parecido (32 e 22, respectivamente). O valor da mediana diminui de 2,5 para 1 mg/L. Também diminuem os valores dos quartis e, menos significativamente, o valor do percentil 97,7. Na época mais recente 75% das amostras apresenta menos de 2 mg/L e apenas 2,3% tem mais de 26 mg/L.

Após esta análise pode-se concluir:

- Uma vez que o fluxo de água subterrânea é predominantemente vertical descendente e os furos amostrados nos dois períodos são praticamente os mesmos, as concentrações deveriam ser superiores no período 1998-2007 em relação a 1991-1997. A situação que se observa é precisamente a contrária. Isto poder-se-ia explicar pela existência de processos de redução no aquífero em todos os intervalos de profundidade estudados.
- As distribuições estatísticas das concentrações a qualquer profundidade apresentam uma maior dispersão no período 1991-1997 que em 1998-2007. Além disto, os valores das medianas e do quartil 75 são inferiores no período mais recente em relação ao mais antigo para qualquer profundidade, abaixo dos 5 m. Isto pode-se também explicar como um efeito do processo de redução, já que as amostras com concentrações superiores às do quartil 75 são menos que as amostras com concentrações entre o valor do quartil 25 e a mediana.
- Uma vez que a profundidade do nível freático oscila entre pouco menos de um metro e aproximadamente 4 m, isto é justamente onde se encontra a fonte de nitratos, as amostras menos profundas acusam menos os possíveis efeitos da redução, se é que este processo existe a esta profundidade.
- Ao observar a Fig. 6.9 parece que abaixo dos 30 m o NO_3^- não é de origem agrícola, excepto nas sondagens perfuradas durante a década de 1990, nas quais se utilizou água de furos superficiais para a perfuração. Ao comentar esta figura foi apontada como causa mais provável para a diminuição das concentrações de nitrato a diluição pelo fluxo natural do aquífero. Após o estudo da Fig. 6.8 dever-se-ia acrescentar a possível contribuição dos processos de redução.

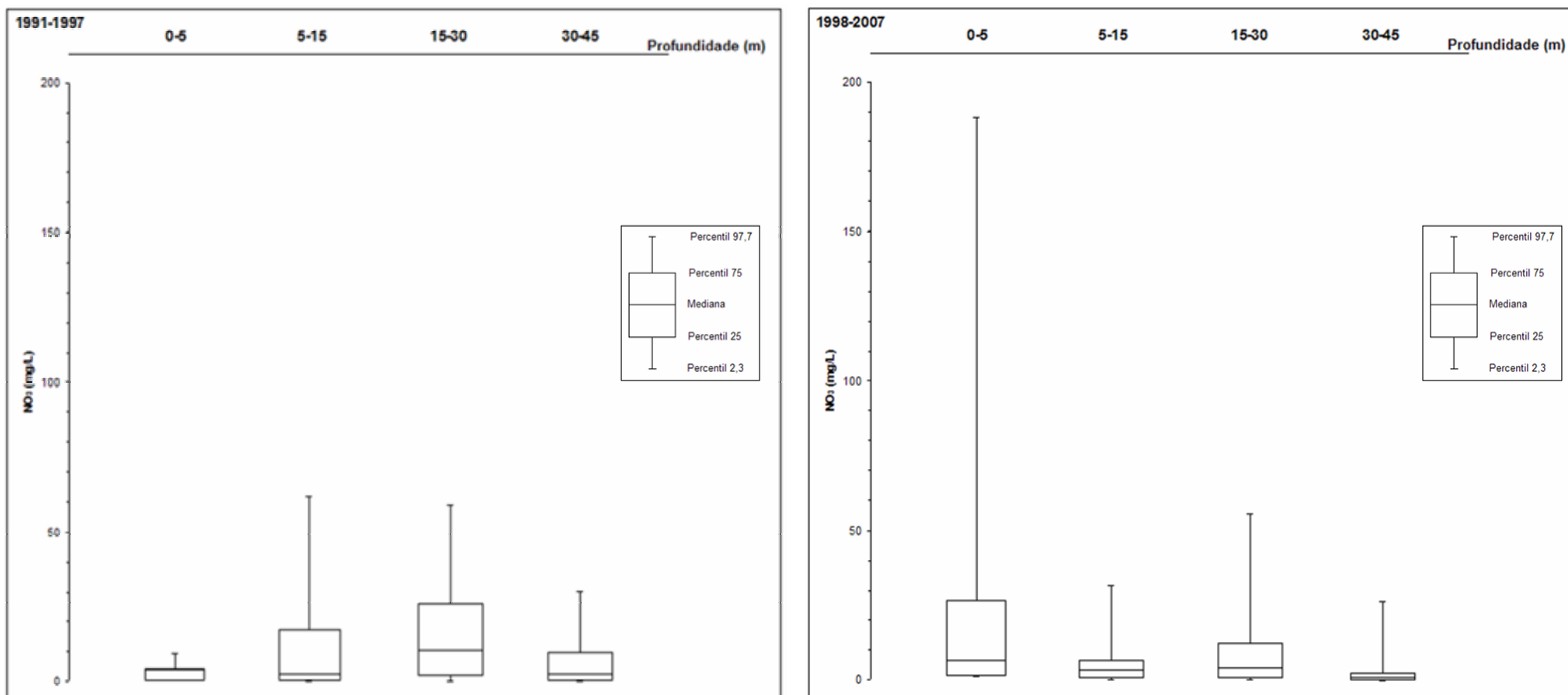


Figura 6.9 a) Distribuição e estatística dos dados no período 1991-1997 em função da profundidade; b) Distribuição e estatística dos dados no período 1998-2007 em função da profundidade.

**7. PROPOSTA DE UMA REDE DE OBSERVAÇÃO
PARA MONITORIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO
AGRÍCOLA**

7.1. GENERALIDADES

O diagnóstico de uma zona potencialmente contaminada é bastante complexo e encontra-se sujeito a diferentes considerações e factores limitativos. A determinação das fontes de contaminação, formas de dispersão desta, tipos de contaminantes, possíveis alterações do meio, etc., devem ser criteriosamente avaliados tendo por base todos os dados disponíveis e representativos da situação real existente.

Na zona em estudo já existem algumas sondagens, que permitiram a obtenção de alguma informação sobre o estado das águas superficiais e subterrâneas. Actualmente existe somente uma rede de controlo e a sua gestão é da responsabilidade da Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Mas as sondagens da rede foram sendo implantadas por diferentes organismos consoante a necessidade de obter dados de uma determinada zona, ou porque houve a oportunidade de realizar um estudo específico, pelo que a sua distribuição é algo aleatória. Além disto, nos últimos anos ocorreu um deslocamento das zonas de cultivo, pelo que existem zonas em risco de ser contaminadas que há 15 anos não estavam. Pode dizer-se que não existe uma boa distribuição das sondagens, havendo zonas com uma cobertura razoável e zonas que quase não têm cobertura.

Por estes motivos parece-nos importante estabelecer uma rede de observações que, tanto quanto possível, contemple pontos já existentes, mas cuja distribuição seja equitativa nas diferentes zonas a controlar, e que permita uma utilização racional de todos os pontos, de forma a minimizar a margem de erro.

Outra das razões subjacentes à criação desta rede, é a de uniformizar as técnicas de amostragem, isto é, proporcionar a definição de procedimentos tanto quanto possível uniformes na toma de amostras. Serve de exemplo o tempo de bombagem que deve ser praticado antes da recolha da amostra, pois é factor que pode induzir erros nos resultados obtidos.

Com este capítulo pretende-se, pois, definir o desenho da rede, indicar qual o método de sondagem mais adequado, propor a localização no terreno de novos pontos de água tendo em consideração os já existentes e indicar o tipo e a frequência de parâmetros químicos que se deveriam medir na rede de controlo da contaminação agrícola de Doñana.

Antes de descrever a rede proposta, apresenta-se uma síntese das principais características que permitem definir uma sondagem e cuidados a ter no seu dimensionamento; tipos de sondagens de monitorização mais frequentes e os métodos de perfuração disponíveis, vantagens e desvantagens.

7.2. DIMENSIONAMENTO DE UMA SONDAGEM

Os principais parâmetros para definir uma sondagem são as profundidades e os diâmetros (em especial a profundidade final e o diâmetro final). Os restantes parâmetros, que fazem parte do programa completo da execução de uma sondagem, encontram-se subordinados a estes dois.

Enquanto a profundidade depende quase exclusivamente da geologia e das características hidrogeológicas da zona estudada. O diâmetro final da perfuração depende de uma grande variedade de factores. Além da geologia e hidrogeologia, há

outros aspectos relacionados com a finalidade da sondagem, tais como execução de ensaios, medidas de nível, amostragem de água, etc.

Aquando da execução da sondagem deve-se ter em conta o “caderno de encargos”, com o programa estabelecido com a empresa executora, que é o documento básico que se utiliza para acompanhar os trabalhos. Este programa constitui por si só um ante-projecto da mesma, e deve conter os seguintes pontos:

- Selecção do método de perfuração mais adequado às finalidades da sondagem (determinante no tipo de máquina a utilizar)
- Esquema de profundidades e diâmetros de perfuração
- Corte litoestratigráfico previsto (quando possível)
- Esquema geral de entubações (profundidades e diâmetros)
- Eventuais isolamentos e/ou cimentações
- Definição do tipo de lamas (se for o caso) adequado à geologia prevista e objectivos da sondagem
- Diagrafias a realizar nas diferentes fases da perfuração
- Amostragem (recolha de testemunhos)

Além da profundidade e diâmetro deve-se ter em conta:

- Materiais de entubação e respectivo diâmetro
- Cimentação
- Ensaios e medições a realizar
- Acabamento

Para a execução de uma sondagem, ou furo, cujos objectivos são a captação de água, os requisitos necessários e etapas a realizar são mais exigentes do que quando se trata de um furo cujo objectivo é o estudo ou análise do estado das águas e controlo piezométrico. Os aspectos mais relevantes para a execução de uma sondagem de investigação são:

- Selecção das colunas de revestimento

As tubagens que são aplicadas numa sondagem de investigação têm, resumidamente, estas finalidades:

- Sustentar as paredes, evitando o desmoronamento
- Permitir a obtenção de amostras às profundidades desejadas
- Evitar perdas de água em zonas fracturadas ou bastante permeáveis

Recentemente as tubagens aplicadas são quase sempre de PVC (ou afins), roscadas (preferencialmente) ou de encaixe rebitado. A selecção dos materiais das colunas deve, no entanto, ser realizada cuidadosamente, uma vez que há materiais, mesmo o PVC, do aço ao carbono, incluindo o aço inoxidável, que podem reagir com a água subterrânea, produzindo dados erróneos nos valores das análises da qualidade da água. Na Tabela 7.1 podem-se ver as vantagens e desvantagens dos diferentes materiais para entubamento, sendo o teflon o material mais inerte mas de custo elevado. O PVC pode ser apropriado a menos que existam elementos químicos orgânicos na água subterrânea. Metais relativamente inertes tais como o aço inoxidável 304 ou 316 não são, geralmente, muito usados para as águas subterrâneas.

Nas especificações das tubagens de revestimento há que definir também o diâmetro nominal ou exterior e o peso ou espessura da tubagem, pois isto é o que vai determinar o diâmetro interior que será o que limita a introdução de bombas ou amostradores.

Antes da colocação de tubagens no furo devem observar-se uns quantos procedimentos especiais de comprovação e controlo, já que pode ocorrer que, ao manejar os tubos, poder haver deformações que impeçam posteriormente a passagem de equipamento no seu interior.

Em redes de observação, é comum as sondagens serem entubadas com tubos cegos e ralos com o mínimo de 2 polegadas mas o diâmetro pode variar até às 8 polegadas. Nas sondagens pouco profundas, ou cuja finalidade é somente a medição de níveis, aplicam-se diâmetros de 2 polegadas. Sondagens mais profundas, onde se pretendam realizar alguns ensaios de bombagem ou investigações geofísicas, são entubadas com o mínimo de 4 polegadas de diâmetro.

Os ralos aplicados nestas sondagens devem ter as seguintes características:

- Devem ser de um material inerte à água da formação
- Devem ter área aberta suficiente para permitir uma rápida recuperação de níveis
- Devem reter possíveis entradas de finos que possam obstruir ou colmatar a sondagem

Os ralos utilizados em sondagens piezométricas devem ter uma área aberta que se aproxime à porosidade natural do terreno, minimizando as perdas de carga e tempo de amostragem.

Na Tabela 7.2 são apresentados alguns dos materiais mais aplicados na zona filtrante. A fibra de vidro é o material que apresenta melhores características, sendo também o mais caro, logo a seguir vem o alumínio. No entanto, o PVC, apesar dos seus problemas de resistência, é hoje a opção mais utilizada, além de ser a opção menos dispendiosa.

A eleição do material da zona filtrante deve fazer-se em função da sua resistência mecânica e da resistência aos componentes químicos da água. Os ralos devem estar preparados para suportar três tipos de esforços:

- Compressão
- Esmagamento
- Tracção

Quando se selecciona o material que se irá aplicar na zona filtrante, também se deve ter em atenção os tipos de ralos existentes e que se resumem na Tabela 7.3.

Além das características dos materiais da zona filtrante também, aquando da sua escolha, deve-se ter em conta a abertura das ranhuras. Em sondagens projectadas sem maciço de areão, o diâmetro da abertura do ralo deverá ser igual ou inferior ao diâmetro dos grãos da formação que se deseja reter. Se a sondagem foi concebida para levar maciço de areão, o diâmetro da abertura deve ser igual ao diâmetro do areão utilizado no

preenchimento multiplicado por 0,8. Para todos os efeitos, o ralo deve reter, pelo menos, 90% do areão colocado.

Apenas por questões de metodologia, refira-se ainda que a coluna definitiva é fechada na base, por um tampão adequado, de forma a impedir a entrada de águas de camadas inferiores ou de materiais finos, garantindo, desta maneira, que se terá apenas água das camadas a monitorizar.

A coluna deverá, na sua instalação, ser bem centrada na sondagem, com utilização de centralizadores de diâmetro idêntico ao da perfuração. Estes centralizadores (de que há vários modelos) também ajudam a garantir a verticalidade da coluna.



Imagem 4. Mimbrales

Tabela 7.1. Vantagens e desvantagens dos diferentes materiais de revestimento da sondagem. Fonte: Instituto Geológico y Minero de España (aguas.igme.es)

Materiais	Vantagens	Desvantagens
PVC	<ul style="list-style-type: none"> - Leve. - Excelente resistência química a álcoois, alcalis, hidrocarbonetos, etc. - Boa resistência química a ácidos minerais fortes e a ácidos de oxidação concentrados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Frágil e menos rígido, mais sensível à temperatura que os materiais metálicos. - Pode reagir e deixar alguns dos seus constituintes na água subterrânea.
Polipropileno	<ul style="list-style-type: none"> - Leve. - Excelente resistência química a ácidos minerais. - Boa resistência a álcoois, alcalis, etc. - Boa resistência a petróleos. - Preço relativamente baixo, comparativamente com o aço inoxidável e Teflon. 	<ul style="list-style-type: none"> - Frágil e menos rígido, mais sensível à temperatura que os materiais metálicos. - Frágil resistência química a concentrados de ácidos de oxidação e hidrocarbonetos aromáticos. - Pode reagir e deixar alguns constituintes na água subterrânea. - Dificilmente mecanizáveis e não se podem fazer ranhuras para filtração.
Teflon	<ul style="list-style-type: none"> - Leve. - Resistente a golpes. - Muito resistente aos ataques químicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menores resistências ténseis que outros plásticos. - Mais caro que outros plásticos, inclusivamente que o aço inoxidável.
Aço suave	<ul style="list-style-type: none"> - Forte, rígido, não apresenta problemas com variações de temperatura. - Preço baixo comparativamente com o Teflon e o aço inoxidável. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mais pesado que os plásticos. - Pode reagir e deixar alguns constituintes na água subterrânea. - Não é tão resistente quimicamente como o aço inoxidável.
Aço inoxidável	<ul style="list-style-type: none"> - Bastante resistente para diferentes amplitudes de temperatura. - Excelente resistência à corrosão e oxidação. - Preço moderado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mais pesado que os plásticos. - Pode corroer-se e deixar cromo em águas muito ácidas. - Pode actuar como catalizador de algumas reacções orgânicas. - Os filtros são de preço superior ao dos plásticos.

Tabela 7.2. Materiais mais aplicados na zona filtrante. Fonte: Universidad Jaume I de Castellón (www.agua.uji.es)

Material	Características
Aço normal (chapa naval ou semelhante)	Custo inicial baixo. Resistência limitada à corrosão e incrustação. Geralmente não é recomendável para serviços de longa duração.
Liga metálica (Bronze amarelo, Bronze vermelho, ...)	Custo 3 a 5 vezes superior ao do aço normal, mas mais adaptável a ralos de fenda continua. Geralmente mais resistente à corrosão que o aço excepto em águas de pH baixo e alto teor em CO ₂ .
PVC	Moderada resistência à pressão exterior. Perigo de esmagamento, sobretudo na fase de desenvolvimento. Boa resistência à corrosão de águas salobras.
Alumínio	Custo 2 a 3 vezes superior ao do aço e maior durabilidade.
Aço Inoxidável	Custo 4 a 6 vezes superior ao do aço normal. Material mais aplicado em ralos de fenda continua. Boa resistência à corrosão.
Fibra de Vidro	Custo 2 a 4 vezes superior ao do aço normal. Excelente resistência à corrosão e incrustação. Profundidade máxima 300 m.
Polietileno poroso	Custo elevado. Indicado em drenagens superficiais. Areias finas e muito finas.

- Acabamento

O acabamento final da sondagem consiste na construção de uma protecção exterior, quase sempre na forma de caixa (por exemplo, betonada), que proteja a sondagem de danos futuros e impeça a entrada de qualquer líquido contaminante.

Existem diferentes tipos de materiais com os quais se pode levar a cabo esta fase, em função do acabamento que se pretende.

- Tampas de protecção

As caixas devem estar providas de uma tampa, em regra metálica, de abertura e fecho mediante o uso de chaves, para impedir o acesso de pessoas alheias. Estas serão roscadas ou soldadas para efectuar a sua união à zona superior da coluna definitiva.



Imagem 5. Aliviadero

Tabela 7.3. Tipos de ralo. Fonte: Universidad Jaume I de Castellón (www.agua.uji.es)

Tipo de ralo	Variedades		Área aberta (%)
De parede exterior lisa	Fenda contínua		15 – 45
	Abertura descontínua	Tubo fendilhado	4 – 25
		Tubo furado	
		Tubo em cunha	25
	Tubo base e forro		
De parede exterior rugosa	Ponte		> 15
	Persiana		> 15
	Pestana		> 15
	Fenda contínua e parede exterior rugosa		15 – 45
Especiais	Tubo base e maciço de areia e areão colado	Simples	25 – 50
		Duplos	25 - 50
	Ralos duplos para colocação de maciços		
	Ralos de materiais singulares		
	Ralos “naturais”		

7.3. Tipos de furos de monitorização

Como já foi referido, os furos de monitorização, podem diferir no desenho e características finais de certos aspectos construtivos consoante os objectivos e finalidades a que se destinem. Com base nestas características, é possível descrever diferentes tipos de furos de monitorização.

O tipo de furo mais simples consiste na colocação de uma coluna com um único tramo de zona ranhurada. Permite obter amostras apenas da camada onde se instalam os ralos, para além da posição do nível piezométrico.

Pode haver furos de monitorização abertos a várias profundidades ou, até, com tubo ralo em toda a extensão. Mas a amostragem obtida nestes casos constitui uma mistura de águas de várias profundidades e, em zonas onde o fluxo hidráulico tem importante componente vertical (ascendente ou descendente), o nível piezométrico medido nestes furos é uma média dos diferentes níveis correspondentes às diversas profundidades.

Há casos em que se justifica a monitorização específica a várias alturas na mesma vertical (exemplo da sondagem concebida por Iglesias, 1999). Há duas formas de se executar este tipo de sondagens: 1) fazer uma sondagem única, de grande diâmetro, até à profundidade máxima que se pretende investigar, e colocar nesta sondagem piezómetros com profundidades diferentes e isolar com cimentações o espaço anelar de forma a garantir a estanquicidade entre cada nível a estudar; 2) fazer conjuntos de furos individuais, mas uns ao lado dos outros, abertos às profundidades desejadas. Esta solução dá muito melhor garantia sobre a fiabilidade das observações de cada camada ou as eventuais diferenças que ocorram numa vertical em unidades aquíferas mais espessas.

7.4. MÉTODOS DE PERFURAÇÃO

Existem vários métodos e formas de perfurar havendo porém limitações inerentes a cada método. Por isso, aquando da selecção do método de perfuração há que ter em conta determinados aspectos tais como:

- profundidade que se pretende alcançar, uma vez que cada método tem alguns limites;
- recuperação de amostra, tipo de amostras desejadas, isto é, de solo, água subterrânea, amostras perturbadas ou não perturbadas, frequência de amostragem, etc;
- litologia do terreno, tipo de formação na qual se vai executar a perfuração, por exemplo, se é do tipo consolidado ou não consolidado;
- acessos, estado do terreno, acessibilidade aos pontos pretendidos, níveis de ruído aceites;
- eliminação de fluidos de perfuração e outros detritos, podendo ser necessário serem transportados para um aterro, ou para instalações especiais;
- custos.

Além dos factores já mencionados, para realizar uma sondagem deve-se ter também em atenção, a finalidade a que se destina. Mas de todos os factores mencionados, o mais determinante, isto é, o que mais condiciona a escolha do método de perfuração, é a geologia do terreno.

Os métodos mais utilizados são:

- Trado Oco (Hollow-stem auger)

Este método utiliza uma sonda helicoidal cujo diâmetro exterior pode ir até às 14" (35 cm). Estas sondas são construídas com uma abertura axial (pode ir até às 10,25" -26 cm- de diâmetro interior) para permitir o acesso ao fundo do furo, sem que seja necessário retirar a sonda, o que permite a realização de ensaios ou obtenção de amostras pouco deformadas. Durante a execução do furo, e ainda na instalação de colunas, a sonda actua como revestimento temporário.

Algumas das vantagens da utilização deste tipo de perfuração, faz com que este método seja usado com alguma frequência. O avanço em profundidade é relativamente rápido, especialmente em furos pouco profundos onde os sedimentos se encontrem pouco consolidados. No processo de perfuração a necessidade de utilizar fluido é praticamente nula.

Muitas vezes este tipo de perfuração é utilizado como método auxiliar de outros, tais como circulação, trado sólido, etc.

As torres que suportam o trado oco são relativamente simples, contendo poucas peças lubrificadas e estas situam-se em posições pouco prováveis de contaminar o furo.

Este método tem, contudo, algumas desvantagens e limitações no seu uso para construção de furos de controlo. Está limitado à perfuração em solos pouco consolidados, a profundidade máxima de perfuração é mais ou menos de 45 m, e esta vê-se consideravelmente reduzida em materiais mais duros. Durante a perfuração, podem

surgir pressões hidrostáticas altas no furo que irão criar problemas, ao arrastar areia para dentro da sonda complicando o procedimento de amostragem e instalação da coluna.

A U.S. Environmental Protection Agency (USEPA, 1986) aconselha a utilizar trados com diâmetros interiores 3 a 5 polegadas (7 a 12 cm) superiores ao diâmetro exterior dos tubos de revestimento, de forma a facilitar a colocação da coluna e material isolante.

- Trado Sólido (Solid-Stem auger)

Este método também utiliza uma sonda helicoidal que mecanicamente corta e vai trazendo os materiais soltos até à superfície. Estes trados encontram-se disponíveis nos diâmetros que vão das 3" às 14" (7 a 35 cm) (SD, Department of environment & natural resources: www.state.sd.us).

Este tipo de perfuração apresenta inúmeras vantagens, a amostragem do material de perfuração é geralmente simples uma vez que não se produzem grandes quantidades deste material; é necessário pouco ou mesmo nenhum fluido de perfuração; o trado é de fácil manutenção, o que o torna fácil de limpar e desinfetar para evitar contaminações, e serve de suporte temporário às paredes do furo. Podem-se utilizar torres mais pequenas, do que as aplicadas no trado oco, simplificando a desinfecção e manobrabilidade o que muitas das vezes faz reduzir os custos de operação deste método. Este método perfura relativamente rápido, especialmente em furos pouco profundos.

Contudo este método também apresenta algumas desvantagens, entre as quais está a possibilidade de ocorrer contaminação de fluidos ao longo do trado. Do mesmo modo que no anterior método, o desenho do trado provoca a formação de uma crosta nas paredes do furo interferindo com o fluxo para o furo. O trado tem de ser removido do furo antes de se começar a amostrar ou a revestir o furo.

O método de perfuração com trado sólido é, portanto, limitado a solos estáveis, que não corram risco de colapso quando o trado é retirado do furo. Materiais saturados, tais como silte, areia e areão, são exemplo do tipo de materiais onde este método não se apresenta adequado para instalação de poços de controlo.

A amostragem de solo durante a execução deste tipo de perfuração é bastante complicada em furos mais profundos, uma vez que o trado tem de ser removido do furo cada vez que se deseje tirar uma amostra.

- Trado Balde (Bucket auger)

Este método de perfuração consiste no corte do material a partir de uma limpadeira cilíndrica com uma ou mais faces cortantes. O solo ao ser "escavado" entra no corpo do trado e aí permanece até ser retirado. Este procedimento é bastante semelhante ao manual. As torres de perfuração podem ser equipadas para perfurar furos de 10" a 60" de diâmetro (25 a 152 cm), e atingir profundidades máximas na ordem dos 30 m.

Normalmente o volume de fluidos de perfuração que é necessário adicionar ao processo de perfuração é pouco ou mesmo nulo. O acesso à ferramenta é bastante fácil, o que torna as operações de limpeza e descontaminação rápidas e simples. Sempre que seja necessário realizar amostragem, o próprio material que vem no trado serve,

normalmente, para os propósitos pretendidos. As torres de perfuração, uma vez mais, são relativamente simples, com poucas peças lubrificadas, e estas encontram-se em pontos pouco prováveis de contaminar o furo ou poço de controlo.

Uma das desvantagens relacionadas com este método é a “produção” de grandes volumes de material de perfuração e fluidos (quando se opera na zona saturada). Caso não se adopte o método “Stovepipe”, que é uma variação deste método e permite o revestimento do furo à medida que se vai perfurando, a possibilidade de propagar contaminação é bastante provável.

Este tipo de perfuração está normalmente limitado a sedimentos pouco litificados, mas coesos. Pode ser eficaz em sedimentos não consolidados, como a areia, caso se vá revestindo o furo à medida que se avança em profundidade, ou se o furo se mantiver com água.

- Circulação Directa (lamas)

Este método é composto por dois conjuntos: a máquina de perfuração e a bomba de lamas (fluido de circulação). A máquina é constituída por chassis, torre, motor, mesa rotativa e coluna de perfuração. Esta é a parte que efectivamente executa a perfuração e é composta por brocas, comandos, varas de perfuração e cabeça giratória. Ao ser accionada a mesa rotativa esta obriga todo o conjunto a girar simultaneamente, e a bomba de lamas injecta o fluido de perfuração por dentro das varas até à coroa (Custodio e Llamas, 1976). A coroa corta e destrói o material do fundo do furo em detritos, os quais são removidos através da injeção, pelo interior das varas, de um fluido de perfuração (água, ou água misturada com bentonite ou outros aditivos) que sobe pelo espaço anelar, entre as paredes do poço e a coluna de perfuração.

O fluido de perfuração também serve para refrigerar a coroa e estabilizar as paredes do furo, deixando uma fina crosta ao longo das paredes da perfuração, que serve também para reduzir a mistura entre aquíferos.

Consoante a dureza e características do terreno, existem disponíveis vários tipos de coroas: tricone, de rodetes e aletas, etc. As brocas tricone e de rodetes, são aplicadas na perfuração de rochas duras e abrasivas. Já a broca de aletas é adequada para solos mais brandos e coesos como argilas e margas.

Neste método de perfuração é aplicado um fluido de perfuração, que geralmente é uma lama bentonítica, com determinados aditivos para melhor adequar as suas características às necessidades da perfuração (Custodio e Llamas, 1976).

Este método apresenta algumas vantagens por ser bastante eficiente e rápido. Permite perfurar cerca de 30 m diários em condições ideais. Além da rapidez de perfuração, pode criar um furo de diâmetro superior a 48”. É bastante adaptável a diferentes tipos de materiais geológicos; somente em casos especiais, tais como zonas calcárias (Karst cavernoso) ou cascalheiras de grandes dimensões e pouco estáveis, é inadequado. O sistema de amostragem é razoável.

Mas além das vantagens referidas, este método apresenta alguns problemas sendo um deles o fluido de perfuração. Caso o fluido não seja bem preparado, este pode invadir zonas permeáveis, comprometendo desta forma possíveis medições que se pretendam vir a fazer. Este problema tem maior impacto, caso estejamos a perfurar um

furo de controlo, cujo objectivo é monitorizar a composição e possíveis evoluções das águas subterrâneas. E no caso do fluido de perfuração ficar bastante espesso poderá inibir o fluxo da água para o poço. Outro problema que pode surgir, no caso do fluido não estar bem preparado, é a obstrução provocada pelos materiais perfurados caso o fluido não seja capaz de os extrair eficientemente.

Apesar de este método apresentar alguns inconvenientes, não deixa de ser uma alternativa a ter em conta, principalmente na perfuração de poços de grande profundidade. Quando se aplica este método é aconselhável que o diâmetro do furo seja 3" a 5" (7 a 12 cm) superior ao diâmetro exterior da coluna de revestimento, de maneira a permitir uma boa colocação desta.

- Percussão mecânica por Cabo

Este método consiste em perfurar através do movimento alternado (subida e descida) de um conjunto constituído por haste, trépano percursor que vai fracturando ou desagregando o solo. O trépano encontra-se suspenso por um cabo de aço montado num tambor. Um balancim regulável dá movimento ao cabo.

Neste tipo de perfuração é frequentemente aplicado um revestimento de tubos de aço, o que previne o colapso no caso de se estar a perfurar materiais não consolidados e evita potenciais propagações de contaminação.

No caso de perfuração de furos de controlo, o método mostra-se bastante eficaz, mas há algumas restrições no que toca a profundidade, diâmetros e capacidade de penetração em certos materiais geológicos. É eficaz a perfurar tanto acima como abaixo do nível freático.

Durante as operações de perfuração, é produzido um pequeno volume de material de perfuração que não causa problemas. Por vezes é necessário usar água para facilitar a remoção dos materiais do fundo do furo, que é efectuada através de uma limpadeira.

Este método é muito bom na detecção, e identificação de camadas que têm água. A amostragem de solo e água, durante a perfuração e instalação de equipamento de monitorização é também facilmente conseguida. As amostras de sedimentos obtidas são de excelente qualidade. As torres de perfuração apresentam-se bastante simples, contêm poucas peças lubrificadas e estas encontram-se em sítios pouco prováveis de causar contaminação do furo.

A principal desvantagem deste método é a sua baixa velocidade de avanço. Em condições limite pode chegar a perfurar apenas cerca de 3 m/dia.

Aquando da perfuração deve-se ter em atenção o diâmetro do furo, visto que este deve ter entre 3" e 5" (7 a 12 cm) mais que o diâmetro exterior da coluna de revestimento.

7.5. Desenho da rede de monitorização da contaminação agrícola em Doñana

- Desenho da rede

Um dos objectivos deste capítulo é indicar os sítios mais adequados para construir novas sondagens de controlo da contaminação. Com base na análise efectuada no Capítulo 6, concluiu-se que a frente de contaminação estará actualmente perto dos 30 m. Portanto, para poder estudar o comportamento e evolução desta face ao tempo, devemos perfurar sondagens a diferentes profundidades mas com apenas um tramo de tubo ralo. Após a análise realizada no capítulo 6, propõe-se a realização de conjuntos de sondagens como alguns dos já existentes (SGOP e C). Como norma geral propõe-se que cada conjunto seja formado por quatro sondagens com as seguintes profundidades: 15 m, 30 m, 45 m e 60 m. Estas condições podem ser alteradas em função da espessura total do aquífero na zona proposta, de modo que nalguns sítios será apenas necessário perfurar às 2 ou três primeiras profundidades. Cada sondagem terá ranhurados apenas os 3 últimos metros, como máximo.

Para apoiar a escolha dos locais foi integrada a informação obtida no capítulo 6, a localização das sondagens já existentes a extensão das áreas em cultivo actualmente (superior à existente 15 anos atrás, sobre tudo na parte superior do arroio de La Rocina) e os requisitos da Directiva 2000/60/CE e da Directiva 2006/118/CE. Ambas exigem a protecção das massas de água subterrâneas e superficiais e dos ecossistemas que dependem destas águas.

Ao avaliar a distribuição das sondagens já existentes na zona, propõe-se a construção de 24 conjuntos de sondagens (M) (Fig. 7.1). Cujas localizações vão complementar e melhorar a informação geológica e hidrogeológica já existente da zona. A colocação destas sondagens foi pensada de forma a poder recolher informação das áreas mais próximas às povoações e zonas agrícolas e conhecer os seus efeitos nas linhas de água mais próximas.

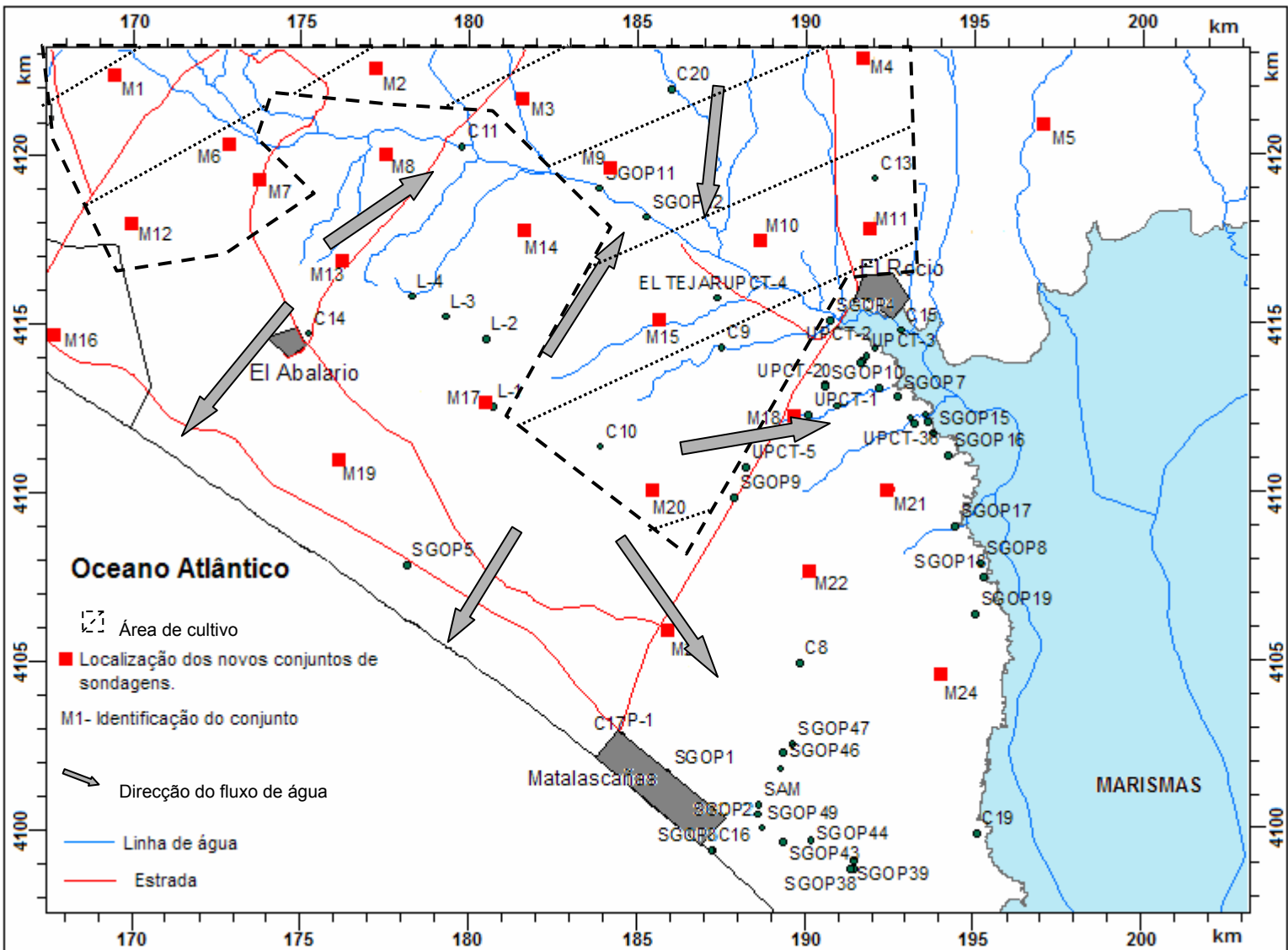


Fig. 7.1. Proposta de localização para os novos conjuntos de sondagens.

- Método de perfuração

Quanto à selecção do método de perfuração mais adequado à zona de estudo, é necessário ter em conta que o terreno de Doñana consiste em areias eólicas finas, sendo, normalmente, bastante complicado perfurar nestas condições sem utilizar bentonite ou outro produto que ajude a manter as paredes do furo. Mas também é importante não contaminar o aquífero, aquando da realização do furo. A permeabilidade do terreno não é muito elevada, devido a este factor qualquer produto que se introduza ficará aí durante muitos anos. Foi o que sucedeu com muitas das sondagens C e SGOP, que hoje ainda se reflecte nas análises a influência da água de perfuração aplicada na realização destes furos.

Tendo em conta todos os parâmetros mencionados e condicionantes inerentes aos diferentes métodos, podem-se destacar dois métodos de perfuração dos anteriormente mencionados. Um deles é o método de trado oco, o qual só se pode aplicar em sedimentos não consolidados e para realização de poços pouco profundos (≈ 15 m). O equipamento necessário é de fácil transporte, o que o torna ideal para as zonas mais inacessíveis.

De acordo com o tipo de geologia na zona é viável a aplicação deste método em furos que atinjam os 2 a 3 m, uma vez que a partir de uma determinada altura devido à fraca sustentação das paredes corre-se o risco de colapso. E caso se esteja a perfurar na zona saturada, a água no fundo do furo pode complicar as operações, devido ao efeito de sucção que pode criar e à baixa taxa de avanço, podendo mesmo esta chegar a ser nula.

Para a realização dos restantes furos (a partir dos 4 m) o método mais adequado às características do terreno e aos objectivos a cumprir é o da Percussão mecânica por cabo. Permite a instalação de piezómetros abertos a diferentes profundidades e é fácil ir procedendo aos isolamentos entre cada piezómetro individual de forma a garantir a necessária estanquicidade entre cada nível aquífero a monitorizar, tendo já sido o método eleito para a realização das sondagens experimentais de Iglesias (1999), dando provas de ser bastante eficaz no tipo de terreno em questão.

A principal vantagem deste método é o facto de não ser necessário utilizar fluidos de perfuração, para a realização destes furos reduzindo bastante os riscos de contaminação. E o facto de a tubagem de revestimento ir sendo colocada à medida que se avança em profundidade evita que haja comunicação hidráulica entre aquíferos, não permitindo que haja trocas de fluidos. Deste modo é salvaguardada a composição original de cada formação.

- Estimativa de custos

Tendo em conta os valores médios previstos para cada conjunto de piezómetros, bem como o tipo de coluna a instalar, o custo total da execução da rede de monitorização aqui proposta, pode estimar-se da ordem de 250 000 euros (duzentos e cinquenta mil euros). Este valor contempla sondagens com o diâmetro de 8" e colunas com diâmetro de 4", em PVC e foram obtidos a partir de consultas a empresas portuguesas.

- Campanhas de amostragem a realizar, parâmetros a medir e frequência

Apesar da rede ser para o controlo da contaminação agrícola, mesmo considerando que o seu principal indicador é o nitrato, o certo é que para interpretar as evoluções do NO_3^- é bastante útil conhecer a composição química completa da água (ou seja, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , mais pH, condutividade eléctrica e alcalinidade).

Tendo em vista a evolução temporal e espacial do nitrato e do sulfato (ver Capítulo 6), propõem-se as seguintes campanhas anuais de amostragem e análise:

- Uma análise trimestral (4 vezes por ano) de NO_3^- e condutividade eléctrica em todas as sondagens.
- Uma análise química completa semestral (2 vezes por ano) para as sondagens com menos de 40 m de profundidade.
- Uma análise completa anual para as sondagens com mais de 40 m de profundidade.

Para que as amostras sejam representativas do aquífero, a amostragem deve realizar-se sempre após a bombagem, de cada sondagem, suficiente para renovar por completo a água contida na tubagem e no terreno próximo a esta. Para assegurar esta renovação há que bombear 3 a 4 vezes o volume contido no furo antes de tomar a amostra, ou então controlar durante a bombagem parâmetros químicos que indiquem a estabilidade das características da água. Os mais utilizados são o pH, a condutividade eléctrica e a temperatura. Quando estes parâmetros se apresentarem praticamente estabilizados a amostra será, então, representativa.



Imagem 6. Passada Soto Grande.

8. CONCLUSÕES

No final do Capítulo 7 apresenta-se o objectivo principal deste trabalho, ou seja, é proposta a rede de monitorização que permitirá melhorar o conhecimento da contaminação agrícola nas zonas já afectadas e em potenciais zonas de risco. Outro dos propósitos desta rede é auxiliar o cumprimento dos requisitos exigidos pela Directiva Quadro da Água, mantendo e se possível melhorando a qualidade das águas, sendo para tal proposto um programa de amostragens que inclui uma análise trimestral de NO_3^- e CE em todas as sondagens; uma análise química completa semestral para todas as sondagens cujo ralo se encontra a menos de 40 m de profundidade e uma análise completa anual para todas as sondagens cujo ralo se encontra a mais de 40 m de profundidade.

Para a execução das sondagens que vão constituir a rede de monitorização, chegou-se à conclusão que o método de perfuração mais adequado será o de percussão mecânica por cabo. A escolha deste método foi baseada nos resultados obtidos na sondagem de investigação desenhada por Iglesias, 1999, cujos dados de amostragem não apresentam influencia da água de perfuração, isto porque este método não necessita que seja adicionado fluido de perfuração.

Optou-se pela realização de grupos de sondagens individuais e não de um poço multitubo como o ideado por Iglesias, 1999, visto a opção das sondagens individuais servir melhor os interesses da rede, além do que é mais económico e fácil de realizar. Cada grupo será composto por quatro sondagens perfuradas aos 15, 30, 45 e 60 metros, o que poderá variar consoante a espessura do aquífero na zona. Estas profundidades foram seleccionadas tendo em conta as interpretações do Capítulo 6.

Pode concluir-se que as sondagens que não se encontram na zona agrícola não são afectadas por essa actividade, uma vez que se atribui a presença de nitratos ao fluido de perfuração. Nas sondagens mais profundas parece que à diluição por parte do fluxo se associa um processo de redução. Já as sondagens que se encontram na zona agrícola apresentam-se bastante afectadas, principalmente as sondagens mais superficiais, entre os zero e 5 m de profundidade (águas freáticas), onde foram detectados os maiores níveis de nitratos. A partir desta profundidade (5 m) dá-se uma redução nas concentrações, a qual se atribui a condições redox, sendo o NO_3^- reduzido pelo solo. Porém este mecanismo natural não é o suficiente para deter toda a carga contaminante resultante da actividade agrícola, tendo-se concluído que a frente de contaminação estará actualmente perto dos 30 m de profundidade. O transporte da carga contaminante também se vê facilitado pela fácil diluição do nitrato e pelo regime de fluxo alterado provocado pelas bombagens intensivas dos poços existentes na zona agrícola.

Outro dos factores que contribui para a disseminação da contaminação é o método de rega aplicado, e para agravar este factor é comum aplicar os fertilizantes dissolvidos na água de rega. Ora visto que a zona é caracterizada como sendo zona de recarga, e o fluxo predominante é vertical descendente que se encontra potenciado pelas bombagens que se realizam, a recarga contaminada fruto dos excedentes de rega é facilmente incorporada no aquífero.

Para que seja preservado o ecossistema do Parque Nacional e Natural de Doñana, não é necessário parar com uma das poucas fontes de sustento da população que vive junto a Doñana. É possível a partir de estratégias ambientais de boas práticas agrícolas diminuir os impactes negativos desta actividade, e até mesmo melhorar o nível de produtividade e de qualidade dos produtos cultivados. Tais estratégias passam pelo correcto uso de fertilizantes, controlando a quantidade ao necessário para o seu correcto desenvolvimento; para tal é fundamental conhecer a fertilidade do solo e suas

características e aplicar fertilizantes nas épocas mais apropriadas, face às necessidades das culturas.

É possível para o sector agrícola obter um desenvolvimento sustentável, e bastante competitivo no mercado, sem colocar em risco o património de Doñana.

Bibliografía & Webgrafía

Custodio, E. 1994. Posibles procesos de contaminación agrícola de aguas subterráneas en el área de Doñana (Huelva). Congreso Nacional Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas, Alcalá de Henares (Madrid, España).

Custodio, E.; Llamas, R. 1976. Hidrología Subterránea, Tomo II, Ediciones Omega, Barcelona.

Custodio, E.; Manzano, M.; Dolz, J. ; Alcalá, F. 2007. El Ciclo del Agua en la Comarca de Doñana. Informe realizado para la Fundación Doñana 21 (Almonte, Huelva). http://www.pds.donana.es/documentos_publicos/115047963170.pdf.

Custodio, E., Palancar, M. 1995. Las aguas subterráneas en Doñana. *Revista de Obras Públicas*, 3340: 31-53.

DIRECTIVA 2006/118/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, de 12 de Diciembre de 2006.

DIRECTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, de 23 de Octubre de 2000.

FAO, 1970. Proyecto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir. Anteproyecto de transformación en regadío de la zona Almonte-Marismas (margen derecha). Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Technical report I, AGL: SF/SPA 16. Roma, 2 volúmenes.

Flores, E. 1994. Tectónica reciente en el margen ibérico suroccidental. Tesis doctoral, Universidad de Huelva, 1-458 + mapas.

Iglesias, M. 1999. Caracterización hidrogeoquímica del flujo del agua subterránea en El Abalario, Doñana, Huelva. Tesis Doctoral, ETSICCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

IGME, 1992. Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno. <http://aguas.igme.es/igme/homec.htm>.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME):
aguas.igme.es/igme/publica/libro51_54/pdf/lib51/in_03.pdf

Lozano, E. 2004. Las aguas subterráneas en Los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas. Tesis Doctoral, ETSICCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Manzano, M.; Custodio, E.; Colomines, M. 2005. El fondo hidroquímico natural del acuífero de Doñana. DVD. Biblioteca Electrónica de la Excm. Diputación Provincial de Soria, nº 6. ISBN: 84- 95099-88-8.

Manzano, M.; Custodio, E., Colomines, M. y Ardila, M. C. 2005. El fondo hidroquímico natural del acuífero de Doñana. V Congreso Ibérico de Geoquímica y IX Congreso de

Geoquímica de España. DVD. Biblioteca electrónica de la Excma. Diputación Provincial de Soria, nº 6. ISBN: 84- 95099-88-8.

Manzano, M.; Custodio, E.; Lozano, E. e Higuera, H. 2007. Relationships between wetlands and the Doñana coastal aquifer (SW Spain). XXXV Int. Ass. Hydrogeologists Congress: Groundwater and Ecosystems. Lisboa, septiembre de 2007. L. Ribeiro, A. Chambel & M.T. Condesso de Melo Eds.

Somoza, L.; Hernández Molina, F.J.; De Andrés, J.R. y Rey, J. 1996. Continental shelf architecture and sea level cycles: Late Quaternary high resolution stratigraphy of the Gulf of Cadiz, Spain. *Geo-Marine Letters*, 17(2): 133-139.

South Dakota, Departement of environment & natural resources:
<http://www.state.sd.us/denr/des/ground/Spills/Handbook/SOP9.pdf>

Trick, T.; Custodio, E. 2003. Hydrodynamic characteristics of the western Doñana Region (area of El Abalario), Huelva, Spain. *Springer-Verlag, Hydrogeology Journal*, DOI:10.1007/s10040-003-0282-4

UPC, 1999. Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte-Marismas y su entorno. Realizado por el grupo de hidrología subterránea de la UPC para el ITGE como base para el seguimiento del impacto del vertido minero de Aznalcóllar. Autores: A. Castro, E. Vázquez, M. Jaén, J. Carrera, M. Manzano, J.M. Salvany y M. Vázquez. Barcelona, enero de 1999, 1-114 + anejos.

Universidad Jaume I de Castellón: www.agua.uji.es/pdf/leccionRH25.pdf

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA, 1986):
<http://www.state.sd.us/denr/des/ground/Spills/Handbook/SOP9.pdf>

ANEXOS

ANEXO I

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DE CADA SONDAAGEM E HISTÓRICO DE
DADOS

Tabela 1. Resumo das características de cada sondagem

Designação	Nome	Ralo (m)	UTM x 29	UTM y 29	Profundidade (m)	Cota (m)	Diâmetro (m)	Método de perfuração
Laguna Mogeia	C8-S16	64-72	722240	4101740	80	29	0.144	RCD
	C8-S17	8-12	722240	4101740	14	29	0.144	RCD
Mimbrales	C9-S19	42-50	719340	4110950	54	29	0.144	RCD
	C9-S20	9-13	719340	4110950	16	29	0.144	RCD
Alamillo	C10-S21	81-85	715920	4107790	89	36	0.144	RCD
	C10-S22	42-46	715920	4107790	54	36	0.144	RCD
	C10-S23	6-10	715920	4107790	12	36	0.144	RCD
	C10-S24	106-110	715920	4107790	118	36	0.144	RCD
Cabezudos	C11-S25	55-59	711260	4116380	63	25	0.144	RCD
	C11-S26	34-38	711260	4116380	40	25	0.144	RCD
	C11-S28	1-5	711260	4116380	5	25	0.144	RCD
Sector III	C13-S30	36-40	723560	4116220	44	18.5	0.144	RCD
	C13-S36	17-21	723560	4116220	23	18.5	0.144	RCD
Abalarío	C14-S32	86-90	707087	4110563	94	65	0.144	RCD
	C14-S33	62-66	707087	4110563	70	65	0.144	RCD
	C14-S34	18-22	707087	4110563	24	65	0.144	RCD
Depuradora Aguas El Rocio	C15-S37	88-94	724590	4111800	98	2.5	0.144	RCD
Hotel El Coto	C16-S40	109-115	720010	4096060	123	3	0.144	RCD
Frente Guardia Civil (Matalascañas)	C17-S42	68-72	716950	4099210	76	20	0.144	
	C17-S43	17-21	716950	4099210	25	20	0.144	
Palacio de Doñana	C19-S49	150-158	727779	4097040	164	3	0.144	RCD
	C19-S50	52-60	727779	4097040	64	3	0.144	RCD
	C19-S51	3-7	727779	4097040	9	3	0.144	RCD
	C19-S52	20-25	727779	4097040	28	3	0.144	RCD
Arroyo Cañada	C20-S46	40-46	717370	4118460	23	30	0.144	RCD
EL TEJAR	EL TEJAR S-1	10-11	719100	4112389	12	16.3	0.075	P
	EL TEJAR S-2	14-15	719100	4112389	16	16.3	0.075	P
	EL TEJAR S-3	18-19	719100	4112389	20	16.3	0.075	P
	EL TEJAR S-4	22-23	719100	4112389	24	16.3	0.075	P
Laguna de Santa Olalla	IGOLALLA1	67-72	724184	4096029		6		RCD
	IGOLALLA2-AZ	44-46	724185	4096031		6		RCD
	IGOLALLA2-AM	25-30	724185	4096031		6		RCD
Laguna del Peladillo	L-1	6-8	712675	4108775	11	50	0.102	IA
Laguna de Los Ansares	L-2	7-9	712370	4110740	12	42	0.102	IA
Laguna Ribetehilos	L-3	8-10	711103	4111325	12	43	0.102	IA
Laguna Zacallón-Lag. Rivatehilos (manantial)	L-4A	7-9	710067	4111869	12.3	50	0.102	IA
	L-4B	2.5-3.4	710067	4111869	3.4	50	0.102	IA
Matalascañas (Urbanización El Rocio)	P-1	120-142	717076	4099278	142	22.74	0.315	RCI
Raya del Corte	SAM-S1	37-45	721288	4097481	56.2	25	0.08	RCD
	SAM-S2	18-22	721281	4097494		25	0.08	RCD
Matalascañas (CarreteraN)	SGOP1-S1	8-10	718525	4098275	10	21.8	0.102	RCD
	SGOP1-S2	40-44	718524	4098278	44	21.8	0.102	RCD
	SGOP1-S3	87-94.80	718524	4098281	95	21.8	0.102	RCD
	SGOP1-S4	134-146	718522	4098281	160	21.8	0.102	RCD
Matalascañas (Sulfasaurus)	SGOP2-S1	10-12	719168	4096796	12	16.5	0.102	RCD
	SGOP2-S2	41-45.6	719165	4096796	45.6	16.5	0.102	RCD
	SGOP2-S3	99-103	719163	4096795	103	16.5	0.102	RCD
	SGOP2-S4	140-146	719160	4096794	150	16.5	0.102	RCD
Matalascañas (paseo marítimo)	SGOP3-S1	8-10	719945	4096052	10	4.4	0.102	RCD
	SGOP3-S2	44-48.7	719947	4096058	48.7	4.4	0.102	RCD
Arroyo La Rocina (Canariéga)	SGOP4-S1	8-10	722498	4111927	10	4.3	0.102	RCD
	SGOP4-S2	36.6-42.6	722492	4111937	50	4.3	0.102	RCD
	SGOP4-S3	83-89	722496	4111929	101.4	4.3	0.102	RCD
	SGOP5-S1	5-7	710415	4103918	7.3	31.5	0.102	RCD
El Asperillo	SGOP5-S2	17-21	710415	4103918	22	31.5	0.102	RCD
	SGOP5-S3	48-54	710415	4103918	54.4	31.5	0.102	RCD
	SGOP5-S4	106-113	710415	4103918	121	31.5	0.102	RCD
	SGOP7-S1	9.4-13.4	724643	4109797	15.5	2.61	0.102	RCD
Hato Villa	SGOP7-S2	45-49	724640	4109800	49.3	2.61	0.102	RCD
	SGOP8-S1	9-13	727384	4105059	18	4.6	0.102	RCD
Pozo Don Ignacio	SGOP8-S2	22-26	727384	4105059	26	4.6	0.102	RCD
	SGOP8-S3 (Surgente)	42-46.8	727384	4105059	61.7	4.6	0.102	RCD
Pequeña Holanda	SGOP9-S1	21-25	719970	4106530	25	30	0.102	RCD
	SGOP9-S2	58-62.4	719970	4106530	62.4	30	0.102	RCD
	SGOP9-S3	75-97	719970	4106530	81	30	0.102	RCD
Soto Chico	SGOP10-S1	9-11	724069	4110022	14.9	5	0.102	RCD
	SGOP10-S2	37-39	724069	4110022	43.4	5	0.102	RCD
	SGOP10-S3	59.6-63.5	724069	4110022	68.1	5	0.102	RCD
Arroyo Rocina (Sacristán)	SGOP11-S1	9-12	715410	4115430	12.3	15	0.102	RCD
	SGOP11-S2	16-23	715410	4115430	21.8	15	0.102	RCD
	SGOP11-S3	47.3-50	715410	4115430	46.4	15	0.102	RCD
Arroyo Rocina (Mª del Puerto)	SGOP12-S1	18.5-24.1	716870	4114650	23.2	10	0.102	RCD
	SGOP12-S2	4.3-7.2	716870	4114650	7.2	10	0.102	RCD
Aguaperal	SGOP15-S1	29.5-31.5	725750	4108800	34.5	1	0.102	RCI
	SGOP15-S2	8.6-11.6	725753	4108800	15.5	1	0.102	RCI
Casa de los Guardas	SGOP16-S1	13.5-16.4	726246	4108161	26.5	9	0.102	IA
Algaida de la Caquera	SGOP17-S1	14.4-16	726569	4106082	20.5	3	0.102	IA
	SGOP17-S2	8.2-11	726569	4106082	11.7	3	0.102	IA
Pilar de la Algaida	SGOP18-S1	11-14	727509	4104657	14	3	0.102	IA
	SGOP18-S2	19.3-22.3	727509	4104657	29.7	3	0.102	IA
Casa de la Algaida	SGOP19-S1	20.2-23.1	727319	4103538	26.8	6	0.102	IA
	SGOP19-S2	8.5-11.4	727319	4103538	14.2	6	0.102	IA
Arroyo Rocina (Sacristán)	SGOP11-S1	9-12	715410	4115430	12.3	15	0.102	RCD
Laguna Santa Olalla	SGOP38-S1	14.2-17	724230	4095780	24.7	10	0.103	
Laguna Dulce	SGOP39-S1	18-21.7	724125	4095780	22.7	10	0.103	
Laguna del Zahillo	SGOP43-S1	11.4-14.2	722060	4096430	14.8	13	0.113	

Tabela 1. (Cont.)

Designação	Nome	Ralo (m)	UTM x 29	UTM y 29	Profundidade (m)	Cota (m)	Diâmetro (m)	Método de perfuração
Laguna del Taraje	SGOP44-S1	11,4--14,2	722890	4096530	14.9	13	0.113	
Laguna del Acebuche	SGOP45-S1	11,4--14,2	721843	4098593	15.2	30	0.113	
Laguna del Ojillo	SGOP46-S1	15,1--17,9	721906	4099090	18	30	0.113	
Laguna Navazo del Toro	SGOP47-S1	13,6--16,5	722166	4099337	17.8	30	0.113	
Laguna del Brezo	SGOP48-S1	11,9--14,2	721263	4097210	14.9	15	0.113	
Laguna Charco del Toro	SGOP49-S1	11,4--14,2	721413	4096827	15	16	0.113	
UPCT	UPCT-1	2.77	722005.9	4109102.6				Trado Manual
	UPCT-2	2.85	723853.9	4111199.3				Trado Manual
	UPCT-3	3.99	723614.8	4110954.3				Trado Manual
	UPCT-4	1.89	719109.1	4112383.4				Trado Manual
	UPCT-5	1.685	720259.5	4107433.7				Trado Manual
	UPCT-10	1.99	722842.8	4109434.5				Trado Manual
	UPCT-17	3.01	722449.2	4110008.4				Trado Manual
	UPCT-18	1.99	722454.5	4110006.6				Trado Manual
	UPCT-19	3.00	722464.1	4109992.6				Trado Manual
	UPCT-20	3.00	722467.3	4109985.2				Trado Manual
	UPCT-21	3.00	723503.2	4110784.5				Trado Manual
	UPCT-22	3.00	723499.3	4110814.0				Trado Manual
	UPCT-23	3.00	723488.7	4110756.5				Trado Manual
	UPCT-24	2.99	723488.1	4110728.0				Trado Manual
	UPCT-32	3.01	725492.7	4109355.5				Trado Manual
	UPCT-33	3.00	725049.2	4109201.5				Trado Manual
	UPCT-35	4.02	725565.7	4109132.3				Trado Manual
	UPCT-36	4.01	725190.3	4109043.0				Trado Manual

RCD- Circulação Directa

RCT- Circulação Inversa

P- Percussão

IA- Injecção de Água

Tabela 2. Dados de amostragem de cada sondagem

Designação	Nome	Ralo (m)	UTM x_29	UTM y_29	Data amostragem	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Laguna Mogeia	C8-S16	64--72	722240	4101740	04-12-1995	5.8	0.9
					11-06-1996	11.5	0.9
					23-11-2000	5.0	1.0
					10-07-2001	22.0	2.0
					10-07-2002	14.0	0.0
	C8-S17	8--12	722240	4101740	04-12-1995	7.7	5.2
					11-06-1996	10.6	3.1
					16-03-1999	11.0	4.0
					19-10-1999	13.0	5.0
					27-05-1999	18.0	4.0
					23-11-2000	8.0	4.0
					10-07-2001	20.0	6.0
					10-07-2002	13.0	5.0
Mimbrales	C9-S19	42--50	719340	4110950	12-12-1996	19.2	43.3
	C9-S20	9--13	719340	4110950	22-09-1999	25.0	43.0
					06-04-1995	24.0	60.0
					05-12-1995	25.0	64.7
Alamillo	C10-S21	81--85	715920	4107790	06-12-1995	7.7	0.1
					09-12-1996	9.6	0.4
					19-09-1999	10.0	1.0
					22-10-1999	7.0	1.0
					20-11-2000	3.0	0.0
					09-07-2001	26.0	0.0
					09-07-2002	24.0	0.0
	C10-S22	42--46	715920	4107790	03-04-1995	1.9	0.1
					06-12-1995	3.8	0.1
					19-03-1999	4.0	0.4
					22-10-1999	7.0	1.0
					28-02-2000	6.0	0.5
					20-11-2000	5.0	0.0
					09-07-2002	15.0	1.0
					25-01-2006	2.4	0.0
	C10-S23	6--10	715920	4107790	06-12-1995	14.4	1.8
					10-06-1996	67.2	58.1
					25-11-2000	25.0	9.0
					09-07-2001	20.0	37.0
					09-07-2002	23.0	15.0
	C10-S24	106--110	715920	4107790	05-12-1995	6.7	0.1
Cabezudos	C11-S25	55--59	711260	4116380	07-12-1995	4.8	6.2
					12-06-1996	3.8	3.9
					04-06-1997	7.0	5.0
	C11-S26	34--38	711260	4116380	03-04-1995	7.7	5.3
					12-06-1996	6.7	9.2
	C11-S28	1--5	711260	4116380	06-04-1995	24.0	1.5
Sector III	C13-S30	36--40	723560	4116220	07-12-1995	57.6	1.2
					28-09-1994	11.5	0.1
					07-12-1995	23.1	1.9
	C13-S36	17--21	723560	4116220	28-09-1994	24.0	18.5
Abalario	C14-S32	86--90	707087	4110563	07-12-1995	14.4	28.2
					13-12-1996	13.4	58.8
					03-04-1995	11.5	5.8
					06-12-1995	7.7	6.1
					03-06-1997	7.0	5.0
					02-07-2001	8.0	6.0
	C14-S33	62--66	707087	4110563	09-07-2002	14.0	5.0
					03-04-1995	3.8	5.0
					06-12-1995	3.8	3.9
					13-12-1996	7.7	3.2
					03-06-1997	7.0	4.0
					18-03-1999	6.0	5.0
	C14-S34	18--22	707087	4110563	22-10-1999	4.0	5.0
					06-12-1995	5.8	13.7
					12-06-1996	9.6	10.3
					03-06-1997	6.0	14.0
					02-07-2001	30.0	12.0
					09-07-2002	12.0	14.0

Tabela 2. (Cont.)

Designação	Nome	Ralo (m)	UTM x_29	UTM y_29	Data amostragem	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Depuradora Aguas El Rocio	C15-S37	88--94	724590	4111800	30-09-1994	14.4	0.3
					09-12-1996	3.8	0.4
Hotel El Coto	C16-S40	109--115	720010	4096060	28-09-1994	40.3	2.2
					09-12-1996	5.8	2.2
Frente Guardia Civil (Matalascañas)	C17-S42	68--72	716950	4099210	09-12-1995	3.8	2.3
					14-06-1996	1.9	2.7
					18-03-1999	3.0	4.0
					20-10-1999	6.0	5.0
	C17-S43	17--21	716950	4099210	28-09-1994	23.1	7.6
					09-12-1995	15.4	19.7
					14-06-1996	21.1	12.7
Palacio de Doñana	C19-S49	150--158	727779	4097040	15-03-1999	10.0	1.0
					24-11-2000	2.0	0.0
	C19-S50	52--60	727779	4097040	29-09-1994	5.8	0.3
					10-12-1996	11.5	0.4
					15-03-1999	3.0	1.0
					26-05-1999	8.0	1.0
					21-11-2000	3.0	0.0
					07-07-2001	22.0	1.0
					12-07-2002	14.0	0.0
	C19-S51	3--7	727779	4097040	29-09-1994	11.5	0.1
					10-12-1996	9.6	0.4
					15-03-1999	12.0	0.5
					26-05-1999	5.0	0.4
					21-10-1999	6.0	3.0
					24-11-2000	2.0	0.0
					07-07-2001	25.0	0.0
					12-07-2002	13.0	0.0
	C19-S52	20--25	727779	4097040	29-09-1994	3.8	0.1
					10-12-1996	11.5	0.4
					15-03-1999	16.0	0.4
					26-05-1999	7.0	0.4
					21-11-2000	3.0	0.0
					12-07-2002	19.0	0.0
Arroyo Cañada	C20-S46	40--46	717370	4118460	05-12-1995	4.8	2.0
					10-06-1996	3.8	0.5
					10-12-1996	11.5	2.1
EL TEJAR	EL TEJAR S-1	10--11	719100	4112389	09-02-1995	17.3	14.8
					04-04-1995	9.6	3.7
					05-12-1995	5.8	1.1
					13-06-1996	3.8	0.5
					13-12-1996	5.8	0.5
					11-11-2005	14.0	1.0
					03-02-2006	4.5	0.0
	EL TEJAR S-2	14--15	719100	4112389	07-02-1995	17.3	28.1
					04-04-1995	4.8	29.2
					05-12-1995	14.4	33.3
					13-06-1995	1.9	3.8
					13-12-1996	2.9	27.6
					11-11-2005	4.0	30.0
					03-02-2006	4.3	55.4
	EL TEJAR S-3	18--19	719100	4112389	07-02-1995	5.8	47.4
					04-04-1995	4.8	59.2
					05-12-1995	11.5	57.8
					13-06-1996	1.9	27.4
					13-12-1996	2.9	37.8
					11-11-2005	5.0	58.0
					03-02-2006	7.3	30.7
	EL TEJAR S-4	22--23	719100	4112389	07-02-1995	5.8	51.1
					04-04-1995	3.8	59.6
					05-12-1995	5.8	49.7
					13-06-1995	2.9	32.0
					13-12-1996	6.7	20.5
					11-11-2005	3.0	62.0
					03-02-2006	1.8	49.3

Tabela 2. (Cont.)

Designação	Nome	Ralo (m)	UTM x_29	UTM y_29	Data amostragem	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Laguna de Santa Olalla	IGOLALLA1	67--72	724184	4096029	13-07-2001	49.0	0.0
					10-07-2002	14.0	3.0
					09-04-2003	12.0	2.0
	IGOLALLA2-AZ	44--46	724185	4096031	13-07-2001	34.0	1.0
					10-07-2002	13.0	4.0
					09-04-2003	14.0	2.0
Laguna del Peladillo	L-1	6--8	712675	4108775	10-07-2002	19.0	2.0
					09-04-2003	11.0	2.0
					17-07-1993	9.6	7.3
					02-12-1993	13.6	0.3
					01-06-1994	5.3	1.1
					01-06-1994	14.4	0.8
Laguna de Los Ánsares	L-2	7--9	712370	4110740	08-02-1995	13.4	0.9
					04-12-1995	7.7	2.7
					16-07-1993	220.8	3.4
					02-12-1993	5.3	0.8
					01-06-1994	5.3	2.2
					01-06-1994	4.8	2.2
Laguna Ribetehilos	L-3	8--10	711103	4111325	08-02-1995	4.8	2.4
					06-12-1995	4.8	3.5
					19-03-1999	11.0	1.0
					22-10-1999	6.0	4.0
					02-12-1993	5.3	0.0
					01-06-1994	9.1	2.8
Laguna Zacallón-Lag. Rivatehilos (manantial)	L-4A	7--9	710067	4111869	01-06-1994	4.8	4.2
					08-02-1995	11.5	0.6
					04-12-1995	1.0	0.5
					10-06-1996	13.4	0.5
					19-03-1999	8.0	0.4
					22-10-1999	13.0	1.0
Matalascañas (Urbanización El Rocío)	P-1	120--142	717076	4099278	12-07-2001	9.0	0.0
					02-12-1993	10.1	4.1
					02-12-1993	13.6	3.9
					09-02-1995	16.3	6.9
					04-12-1995	4.8	10.1
					10-06-1996	5.8	4.1
					19-03-1999	14.0	2.0
					22-10-1999	12.0	1.0
					02-03-2000	12.0	2.0
					14-04-1993	6.0	7.0
					15-10-1993	6.0	5.0
					12-04-1994	7.0	8.0
					15-04-1994	7.0	8.0
					20-10-1994	5.0	7.0
					18-04-1995	4.0	5.0
					13-11-1995	5.0	5.0
					02-05-1996	6.0	6.0
					10-10-1996	12.0	5.0
					28-04-1997	6.0	4.0
					22-10-1997	12.0	6.0
					11-05-1998	2.0	8.0
					22-04-1999	10.0	5.0
					04-11-1999	10.0	6.0
					13-04-2000	1.0	2.0
					25-10-2000	10.0	0.0
					10-04-2001	7.0	4.0
					06-11-2001	8.0	7.0

Tabela 2. (Cont.)

Designação	Nome	Ralo (m)	UTM x_29	UTM y_29	Data amostragem	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Raya del Corte	SAM-S1	37--45	721288	4097481	13-07-2001	76.0	0.0
					10-07-2002	13.0	1.0
	SAM-S2	18--22	721281	4097494	13-07-2001	50.0	0.0
					10-07-2002	14.0	0.0
Matalascañas (CarreteraN)	SGOP1-S1	8--10	718525	4098275	05-05-1991	82.2	18.3
					13-06-1996	299.7	79.6
					22-03-1999	55.0	29.0
	SGOP1-S2	40--44	718524	4098278	02-04-1991	2.3	2.1
					10-10-1991	67.2	16.9
					10-03-1992	5.1	4.3
					02-12-1995	15.4	6.6
					20-11-2000	8.0	6.0
	SGOP1-S3	87--94,80	718524	4098281	03-04-1991	2.3	3.5
					10-10-1991	3.8	0.9
					10-03-1992	9.5	1.2
					17-07-1993	11.5	6.4
					31-05-1994	19.2	2.4
					02-06-1994	4.8	0.1
					02-12-1995	1.0	0.5
					14-06-1996	7.7	0.5
					22-03-1999	3.0	1.0
					20-10-1999	6.0	2.0
					20-11-2000	1.0	2.0
	SGOP1-S4	134--146	718522	4098281	05-04-1991	10.1	2.1
					10-10-1991	9.6	0.8
					10-03-1992	2.2	2.9
					02-12-1995	1.0	0.5
					14-06-1996	4.8	0.9
Matalascañas (Sulfasaurus)	SGOP2-S1	10--12	719168	4096796	20-11-2000	3.0	2.0
					21-07-1991	30.2	36.7
					21-10-1991	34.1	51.8
					02-06-1994	19.2	2.7
	SGOP2-S2	41--45,6	719165	4096796	22-07-1991	29.4	24.7
					10-10-1991	9.6	4.8
					23-10-1991	2.3	15.2
					11-03-1992	2.0	3.9
	SGOP2-S3	99--103	719163	4096795	23-07-1991	6.5	3.5
					10-10-1991	13.4	8.1
					11-03-1992	1.2	3.2
	SGOP2-S4	140--146	719160	4096794	24-07-1991	22.4	42.1
					10-10-1991	17.3	26.1
					10-03-1992	3.6	17.3
					13-06-1996	1.9	0.5
Matalascañas (paseo marítimo)	SGOP3-S1	8--10	719945	4096052	21-07-1991	30.2	36.7
					01-10-1991	40.3	35.0
					21-10-1991	34.1	51.8
					02-06-1994	67.2	28.7
					28-09-1994	67.2	28.1
	SGOP3-S2	44--48,7	719947	4096058	22-07-1991	29.4	24.7
					10-10-1991	12.2	24.8
					23-10-1991	2.3	15.2
					11-03-1992	1.4	3.5
					17-03-1999	7.0	4.0
Arroyo La Rocina (Canariega)	SGOP4-S1	8--10	722498	4111927	20-10-1999	9.0	8.0
					15-01-1992	23.4	21.5
					09-12-1996	9.6	1.1
					17-03-1999	3.0	1.0
					09-07-2001	32.0	2.0
					23-01-2006	2.7	0.0
	SGOP4-S2	36,6--42,6	722492	4111937	24-04-2006	7.2	2.6
					14-01-1992	2.8	0.0
					11-03-1992	0.0	0.0
					09-12-1996	9.6	0.0
					17-03-1999	6.0	1.0
	SGOP4-S3	83--89	722496	4111929	12-07-2001	36.0	1.0
					10-01-1992	2.8	0.0
					11-03-1992	0.0	0.0
					09-12-1996	11.5	0.4
					12-07-2001	44.0	1.0

Tabela 2. (Cont.)

Designação	Nome	Ralo (m)	UTM x_29	UTM y_29	Data amostragem	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
El Asperillo	SGOP5-S1	5--7	710415	4103918	27-06-1992	13.4	29.7
					15-06-1996	17.3	0.5
					19-03-1999	28.0	1.0
					22-10-1999	23.0	1.0
					02-03-2000	10.0	0.5
	SGOP5-S2	17--21	710415	4103918	26-06-1992	2.7	19.9
					15-07-1993	3.8	3.3
					19-03-1999	9.0	1.0
					22-10-1999	4.0	5.0
					02-03-2000	3.0	4.0
	SGOP5-S3	48--54	710415	4103918	12-07-2001	4.0	3.0
					11-07-2002	15.0	2.0
					28-06-1992	2.7	24.7
					15-07-1993	3.8	3.2
					19-03-1999	10.0	2.0
	SGOP5-S4	106--113	710415	4103918	22-10-1999	3.0	2.0
					02-03-2000	1.0	1.0
					12-07-2001	3.0	2.0
					08-06-1992	3.1	21.5
					15-06-1996	13.4	0.5
Hato Villa	SGOP7-S1	9,4--13,4	724643	4109797	17-07-1993	5.8	7.0
					31-01-2006	1.5	4.0
					27-04-2006	2.7	10.3
	SGOP7-S2	45--49	724640	4109800	17-07-1993	5.8	0.2
Pozo Don Ignacio	SGOP8-S1	9--13	727384	4105059	01-02-2006	6.5	0.0
					15-07-1993	6.7	1.9
					23-11-2000	3.0	0.0
					01-02-2006	4.1	1.3
	SGOP8-S2	22--26	727384	4105059	28-04-2006	4.6	0.0
					15-07-1993	3.8	1.6
					31-05-1994	7.7	0.1
					10-12-1996	11.5	0.4
	SGOP8-S3 (Surgente)	42--46,8	727384	4105059	23-11-2000	2.0	0.0
					02-02-2006	1.2	0.0
					15-07-1993	1.9	11.4
					31-05-1994	7.7	0.1
Pequeña Holanda	SGOP9-S1	21--25	719970	4106530	23-11-2000	2.0	2.0
					29-11-2000	8.0	2.0
					10-07-2001	10.0	0.0
					17-07-1993	11.5	6.4
					17-07-1993	19.2	7.8
	SGOP9-S2	58--62,4	719970	4106530	31-05-1994	19.2	2.4
					04-04-1995	9.6	13.5
					28-11-2000	18.0	15.0
					12-07-2001	5.0	11.0
					17-07-1993	11.5	6.4
					31-05-1994	19.2	2.4
					14-06-1996	7.7	0.5
	SGOP9-S3	75--97	719970	4106530	27-05-1999	7.0	0.4
					19-10-1999	7.0	1.0
					28-11-2000	5.0	1.0
					12-07-2001	20.0	1.0
Soto Chico	SGOP10-S1	9--11	724069	4110022	17-07-1993	9.6	1.0
					28-11-2000	1.0	3.0
					31-05-1994	8.6	3.6
					11-06-1996	3.8	2.9
					10-11-2005	5.0	4.0
	SGOP10-S2	37--39	724069	4110022	30-01-2006	2.0	3.4
					27-04-2006	2.1	3.0
					31-05-1994	9.6	1.4
					11-06-1996	7.7	0.5
	SGOP10-S3	59,6--63,5	724069	4110022	30-01-2006	8.1	0.0
					31-05-1994	4.8	0.2
					01-12-1995	4.8	0.5
					11-06-1996	9.6	0.5
					21-11-2000	2.0	0.0
					30-01-2006	6.8	0.0

Tabela 2. (Cont.)

Designação	Nome	Ralo (m)	UTM x_29	UTM y_29	Data amostragem	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Arroyo Rocina (Sacristán)	SGOP11-S1	9--12	715410	4115430	03-04-1995	4,8	0,1
					30-11-1995	8,6	0,7
					17-03-1999	12,0	0,4
					19-10-1999	6,0	1,0
					23-04-2006	12,8	5,3
	SGOP11-S2	16--23	715410	4115430	10-06-1996	3,8	0,1
					17-03-1999	17,0	1,0
					19-10-1999	5,0	2,0
					08-11-2005	7,0	2,0
					23-04-2006	0,2	0,0
	SGOP11-S3	47,3-50	715410	4115430	17-03-1999	4,0	1,0
					19-10-1999	6,0	3,0
08-11-2005					4,0	1,0	
Arroyo Rocina (Mª del Puerto)	SGOP12-S1	18,5--24,1	716870	4114650	03-04-1995	14,4	10,7
					30-11-1995	13,4	13,8
					10-06-1996	10,6	2,2
					03-06-1997	12,0	8,0
					03-06-1997	12,5	5,9
					17-03-1999	16,0	7,0
					19-10-1999	15,0	8,0
					08-11-2005	6,0	23,0
					23-04-2006	14,3	18,7
	SGOP12-S2	4,3--7,2	716870	4114650	03-04-1995	1,0	4,0
					10-06-1996	7,0	2,0
					03-06-1997	7,7	0,5
					03-06-1997	5,0	1,0
					17-03-1999	5,8	0,1
Aguaperal	SGOP15-S1	29,5--31,5	725750	4108800	31-05-1994	3,8	0,1
					01-12-1995	10,6	2,9
					11-06-1996	1,0	0,4
					31-01-2006	3,0	0,0
	SGOP15-S2	8,6--11,6	725753	4108800	31-05-1994	2,9	3,1
					01-12-1995	10,6	1,6
					11-06-1996	5,8	1,1
					31-01-2006	2,8	1,4
					27-04-2006	2,8	4,7
Casa de los Guardas	SGOP16-S1	13,5--16,4	726246	4108161	31-05-1994	4,8	0,1
					19-04-1996	9,6	0,5
					21-11-2000	5,0	1,0
					31-01-2006	5,8	0,0
Algaída de la Caquera	SGOP17-S1	14,4--16	726569	4106082	31-05-1994	3,8	1,4
					10-07-2002	22,0	1,0
					01-02-2006	3,3	5,3
	SGOP17-S2	8,2--11	726569	4106082	31-05-1994	5,8	5,2
					23-11-2000	1,0	0,0
Pilar de la Algaída	SGOP18-S1	11--14	727509	4104657	01-02-2006	13,2	11,9
					31-05-1994	9,6	0,1
					01-12-1995	2,9	0,5
					11-06-1996	1,0	0,4
	SGOP18-S2	19,3--22,3	727509	4104657	03-02-2006	7,7	0,0
					31-05-1994	4,8	2,2
					01-12-1995	5,8	0,5
					11-06-1996	1,9	0,4
					21-11-2000	2,0	0,0
Casa de la Algaída	SGOP19-S1	20,2--23,1	727319	4103538	03-02-2006	3,5	0,0
					31-05-1994	9,6	2,2
					04-12-1995	2,9	1,1
	SGOP19-S2	8,5--11,4	727319	4103538	21-11-2000	2,0	0,0
Laguna Santa Olalla	SGOP38-S1	14,2--17	724230	4095780	31-05-1994	13,4	1,3
					03-02-2006	6,3	0,0
					15-03-1999	10,0	3,0
					26-05-1999	10,0	3,0
					18-10-1999	6,0	3,0
					27-11-2000	2,0	5,0
09-07-2001	22,0	4,0					

Tabela 2. (Cont.)

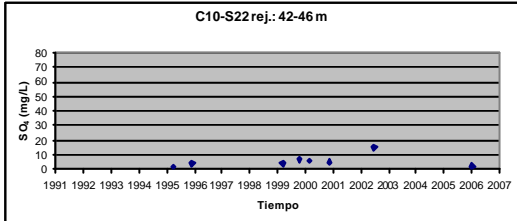
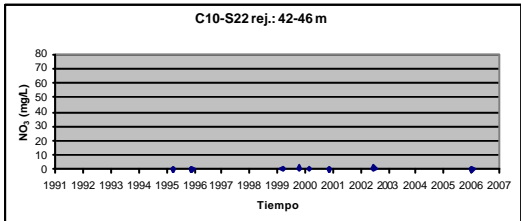
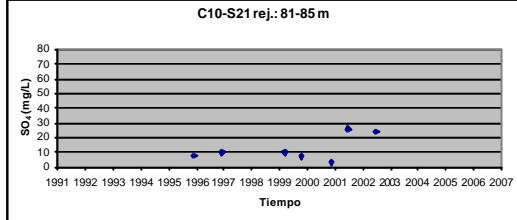
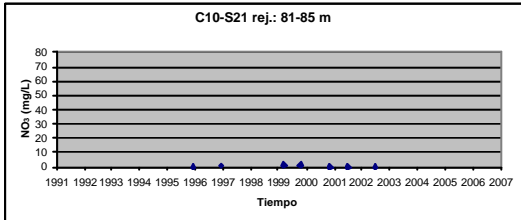
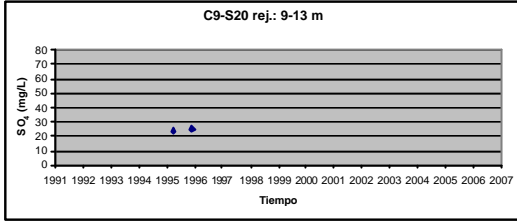
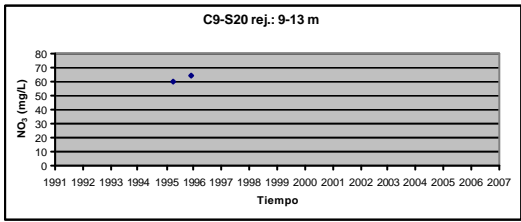
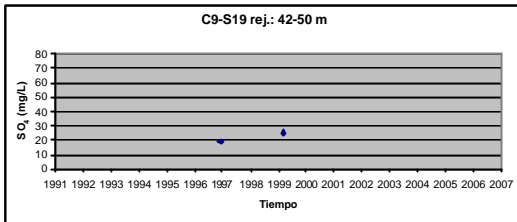
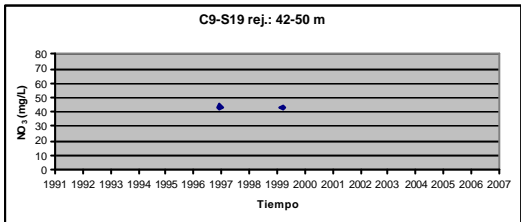
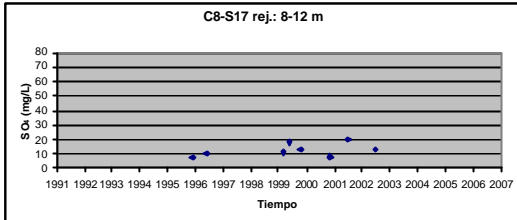
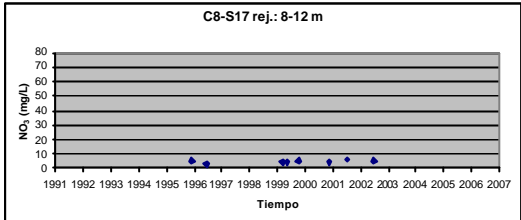
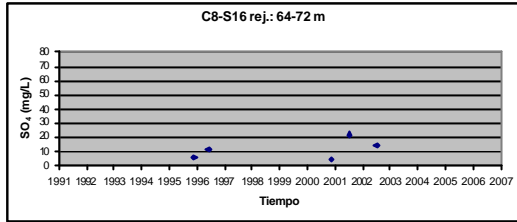
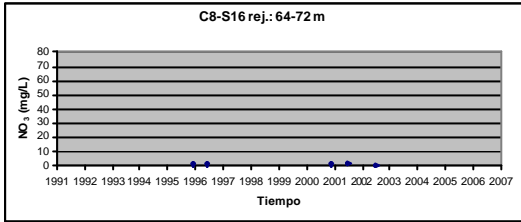
Designação	Nome	Ralo (m)	UTM x_29	UTM y_29	Data amostragem	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Laguna Dulce	SGOP39-S1	18--21,7	724125	4095780	15-03-1999	4.0	3.0
					26-05-1999	3.0	5.0
					18-10-1999	3.0	4.0
					27-11-2000	3.0	8.0
Laguna del Zahillo	SGOP43-S1	11,4--14,2	722060	4096430	16-03-1999	24.0	1.0
					26-05-1999	38.0	1.0
					18-10-1999	46.0	3.0
					27-11-2000	13.0	3.0
Laguna del Taraje	SGOP44-S1	11,4--14,2	722890	4096530	11-07-2002	41.0	1.0
					16-03-1999	20.0	1.0
					26-05-1999	15.0	1.0
					18-10-1999	7.0	4.0
Laguna del Acebuche	SGOP45-S1	11,4--14,2	721843	4098593	27-11-2000	5.0	3.0
					16-03-1999	10.0	6.0
					27-05-1999	8.0	6.0
					19-10-1999	7.0	7.0
Laguna del Ojillo	SGOP46-S1	15,1--17,9	721906	4099090	22-02-2000	6.0	6.0
					16-05-2000	2.0	7.0
					27-11-2000	3.0	6.0
					10-07-2001	5.0	7.0
Laguna Navazo del Toro	SGOP47-S1	13,6--16,5	722166	4099337	16-03-1999	9.0	8.0
					27-05-1999	15.0	8.0
					19-10-1999	12.0	8.0
					27-11-2000	10.0	5.0
Laguna del Brezo	SGOP48-S1	11,9--14,2	721263	4097210	16-03-1999	8.0	13.0
					27-05-1999	9.0	12.0
					19-10-1999	5.0	14.0
					22-02-2000	6.0	13.0
Laguna Charco del Toro	SGOP49-S1	11,4--14,2	721413	4096827	17-05-2000	6.0	13.0
					27-11-2000	3.0	13.0
					16-03-1999	19.0	5.0
					26-05-1999	20.0	5.0
					18-10-1999	10.0	11.0
					22-02-2000	13.0	10.0
					27-11-2000	8.0	8.0
					11-07-2002	20.0	2.0
					16-03-1999	304.0	13.0
					26-05-1999	172.0	10.0
					18-10-1999	181.0	16.0
					16-05-2000	400.0	27.0
					27-11-2000	78.0	6.0
					10-07-2001	418.0	11.0
					11-07-2002	253.0	8.0

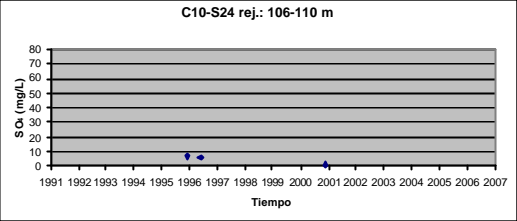
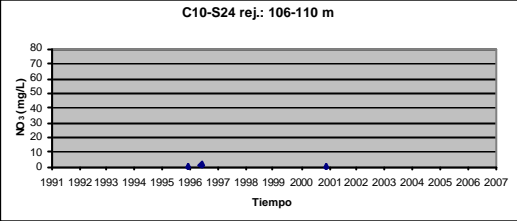
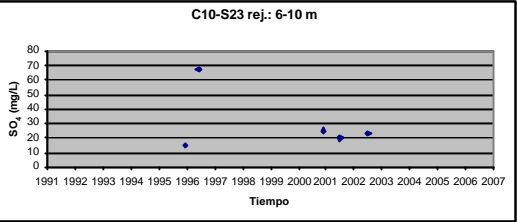
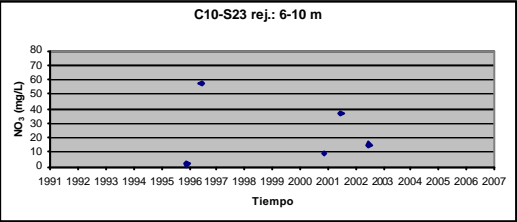
Tabela 2. (Cont.)

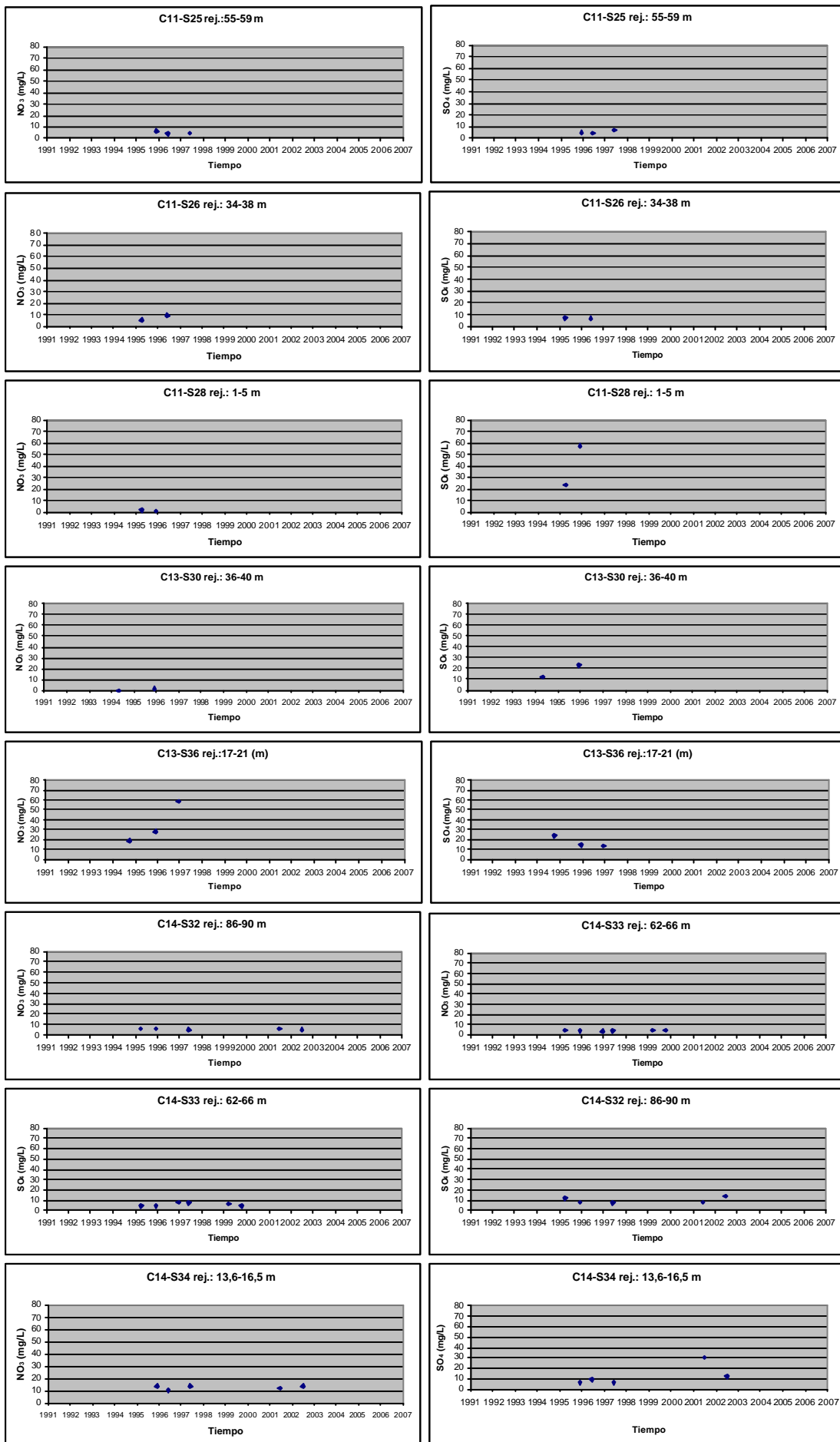
Designação	Nome	Ralo (m)	UTM x_29	UTM y_29	Data amostragem	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
UPCT	UPCT-1	2.77	722005.9	4109102.6	02-02-06	8.6	18.9
					26-04-06	11.9	4.4
					26-11-06	5.0	7.7
	UPCT-2	2.85	723853.9	4111199.3	12-11-05	15.0	17.0
					30-01-06	23.9	8.3
					27-04-06	24.9	5.3
	UPCT-3	3.99	723614.8	4110954.3	28-11-06	22.9	3.5
					12-11-05	15.0	8.0
					02-02-06	37.8	9.6
	UPCT-4	1.89	719109.1	4112383.4	27-04-06	33.5	8.0
					26-11-06	24.5	9.2
					25-04-06	11.9	0.0
	UPCT-5	1.685	720259.5	4107433.7	20-11-06	13.9	46.4
					26-04-06	83.1	238.0
					20-11-06	75.0	75.4
	UPCT-10	1.99	722842.8	4109434.5	02-08-06	52.0	0.0
					21-11-06	69.2	5.5
	UPCT-17	3.01	722449.2	4110008.4	29-07-06	94.7	0.0
					28-11-06	53.1	38.7
	UPCT-18	1.99	722454.5	4110006.6	29-07-06	28.2	1.9
					28-11-06	77.4	5.1
	UPCT-19	3.00	722464.1	4109992.6	29-07-06	62.4	0.0
					28-11-06	26.5	1.2
	UPCT-20	3.00	722467.3	4109985.2	31-07-06	99.4	2.9
					28-11-06	59.5	204.6
	UPCT-21	3.00	723503.2	4110784.5	31-07-06	47.0	0.0
					28-11-06	44.4	4.8
	UPCT-22	3.00	723499.3	4110814.0	31-07-06	4.4	14.2
					28-11-06	6.1	26.1
	UPCT-23	3.00	723488.7	4110756.5	01-08-06	53.3	33.2
					28-11-06	37.8	26.6
	UPCT-24	2.99	723488.1	4110728.0	01-08-06	46.5	0.0
					28-11-06	28.3	24.4
	UPCT-32	3.01	725492.7	4109355.5	23-11-06	6.0	7.0
					17-03-07	6.7	6.4
	UPCT-33	3.00	725049.2	4109201.5	23-11-06	17.0	37.9
					22-04-07	10.9	52.6
	UPCT-35	4.02	725565.7	4109132.3	23-11-06	18.6	41.6
					18-03-07	19.2	47.2
	UPCT-36	4.01	725190.3	4109043.0	23-11-06	7.9	65.6
					18-03-07	3.0	69.8

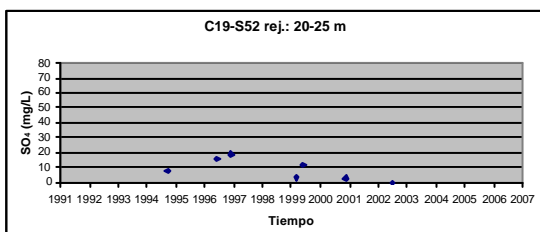
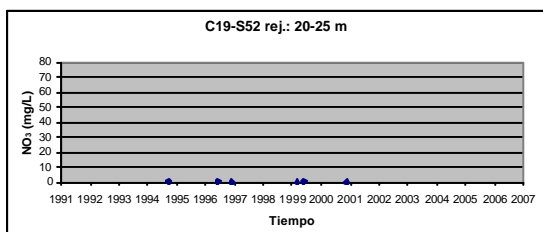
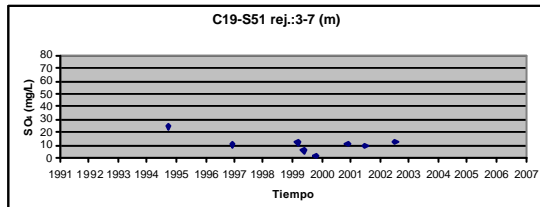
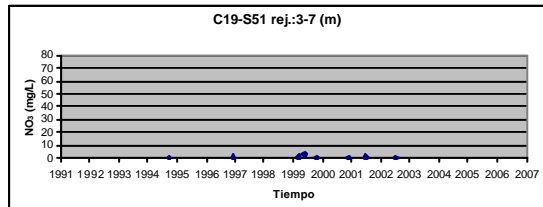
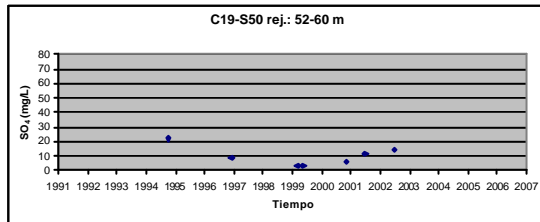
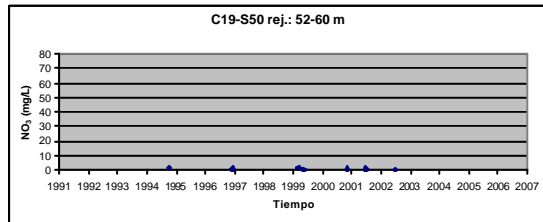
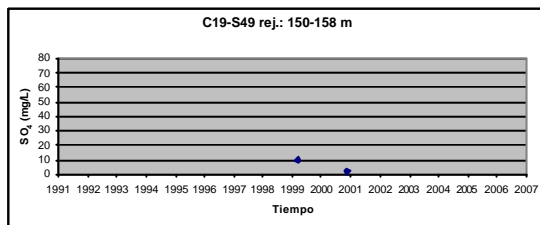
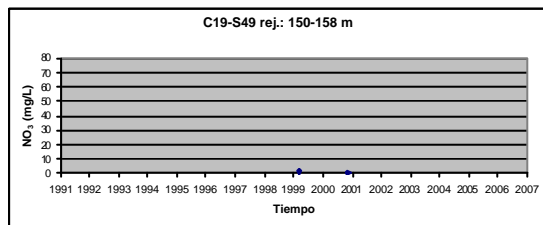
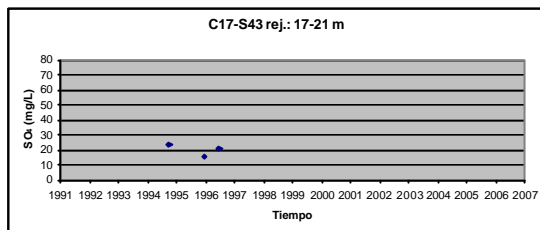
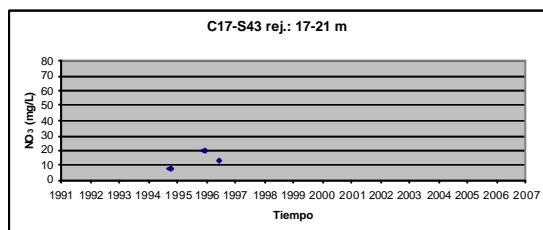
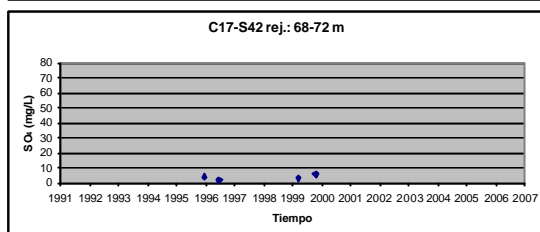
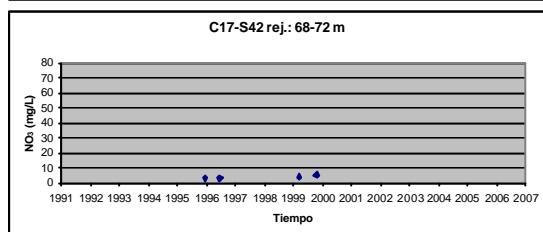
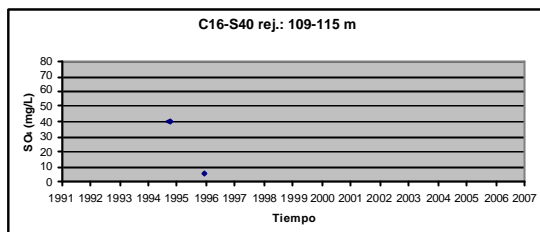
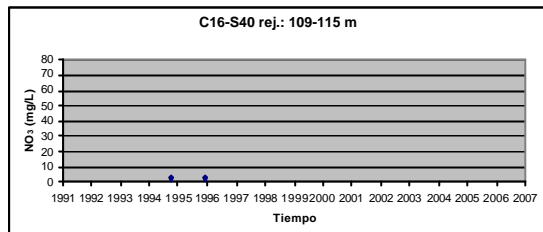
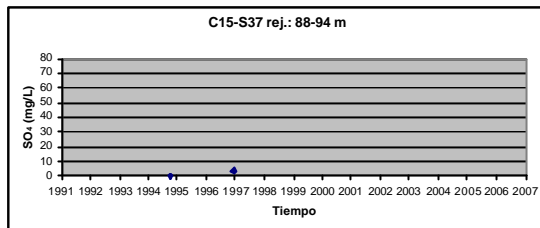
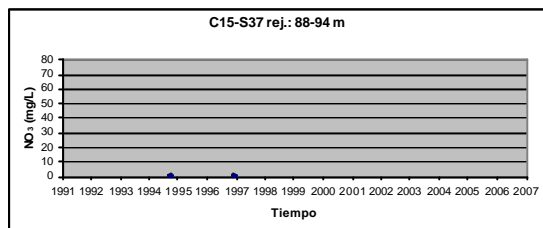
ANEXO II

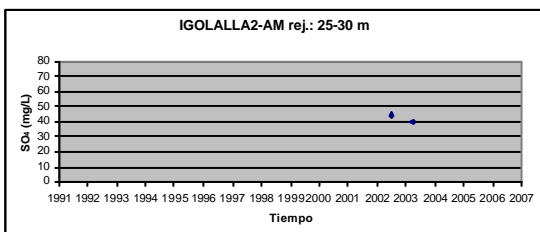
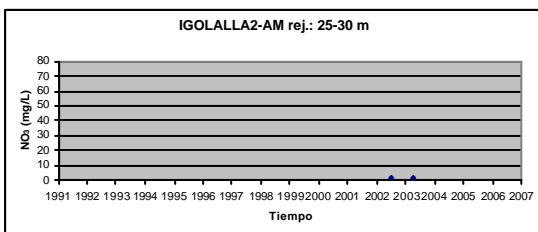
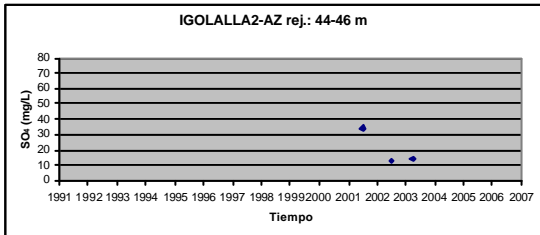
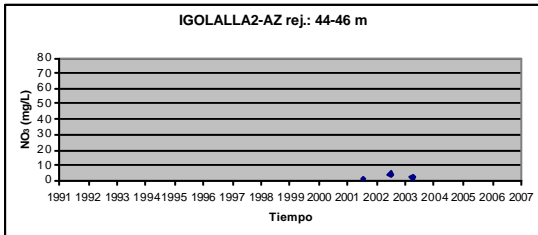
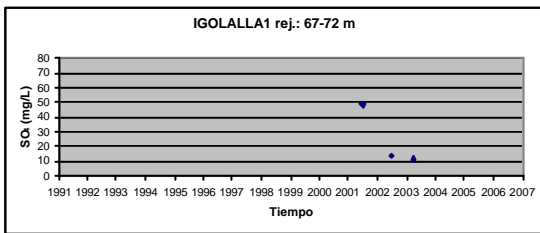
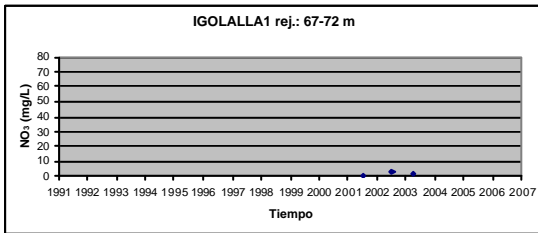
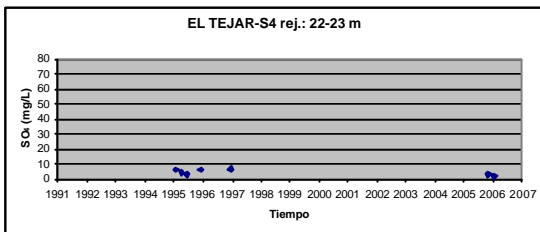
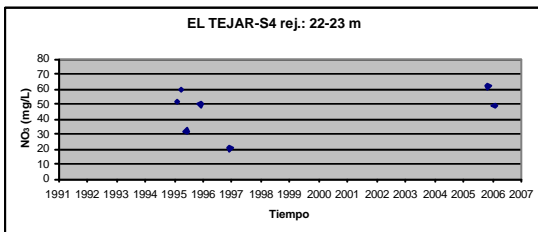
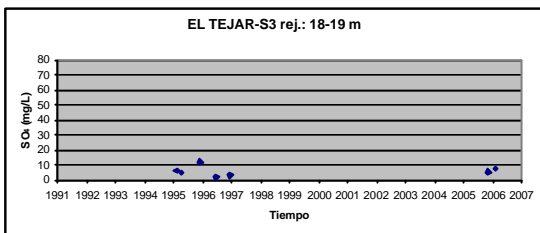
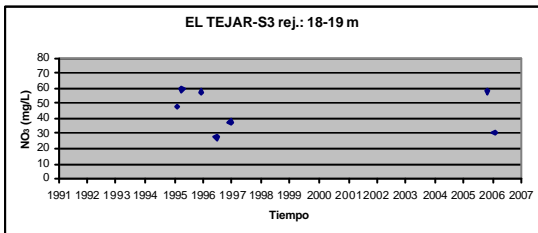
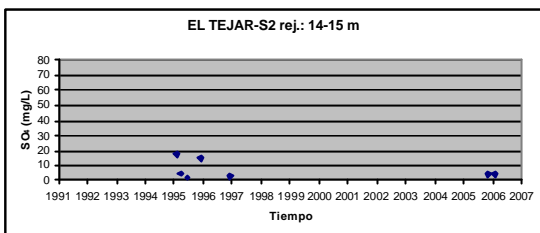
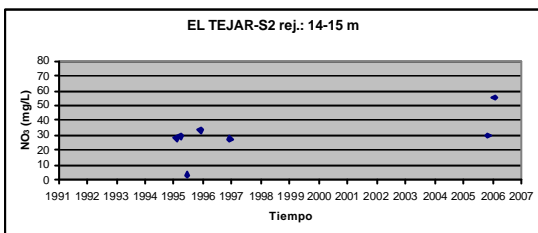
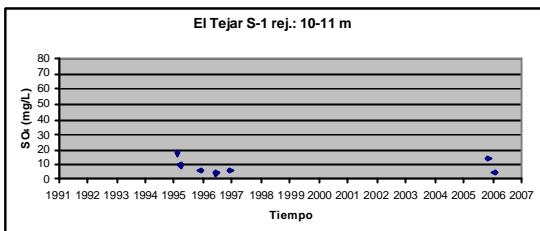
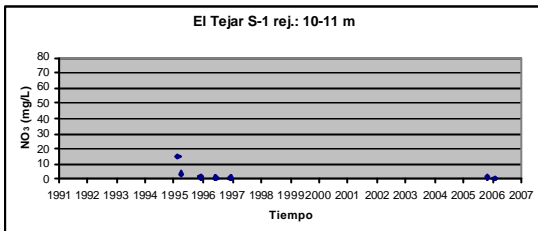
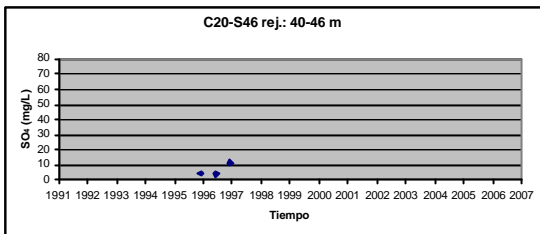
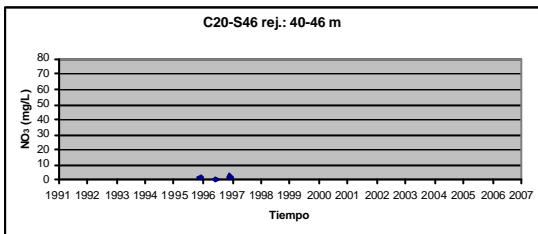
EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE NO_3^- E SO_4^{2-} EM TODOS
OS PONTOS ESTUDADOS

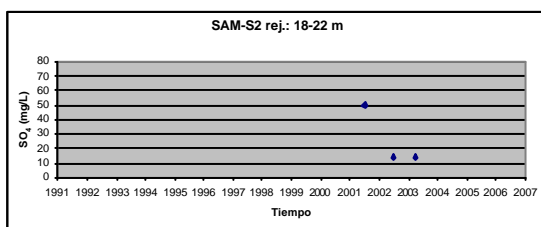
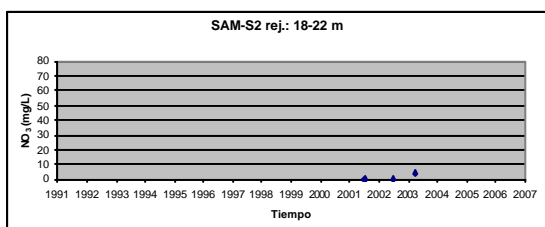
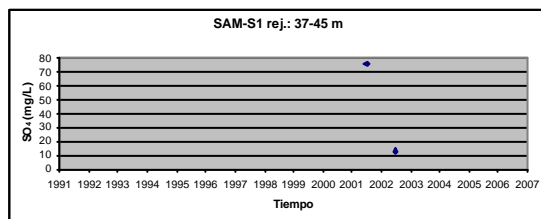
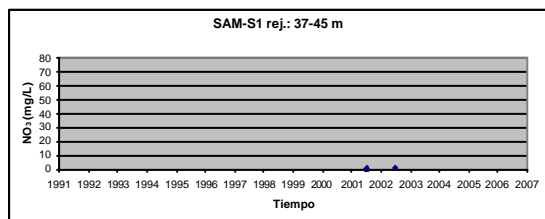
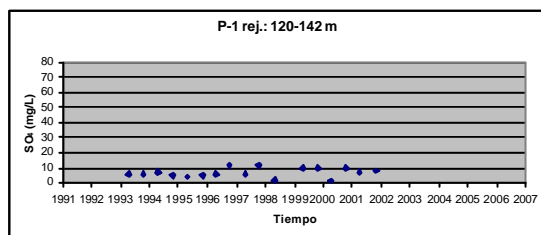
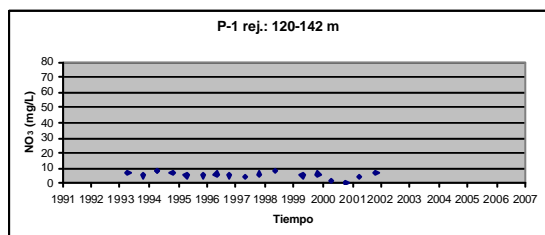
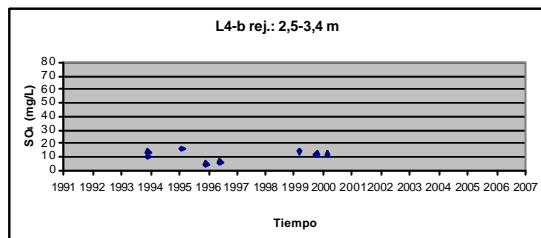
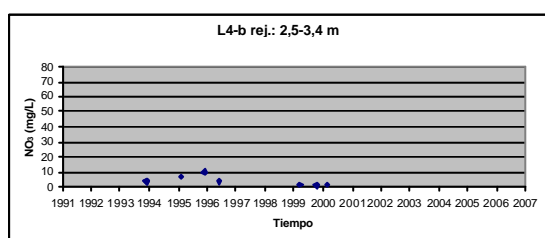
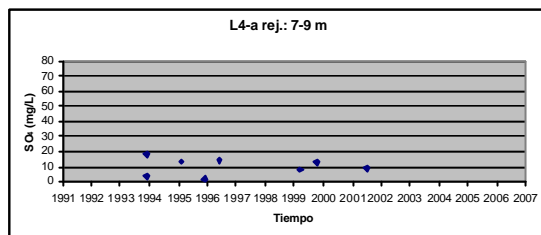
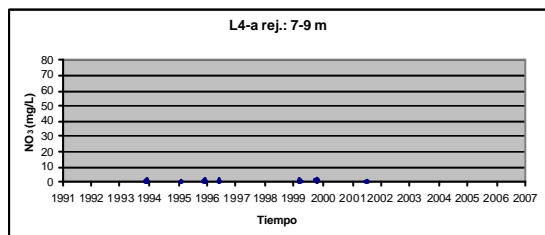
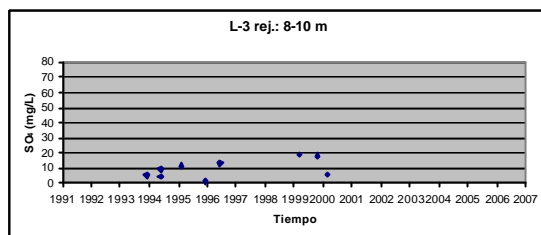
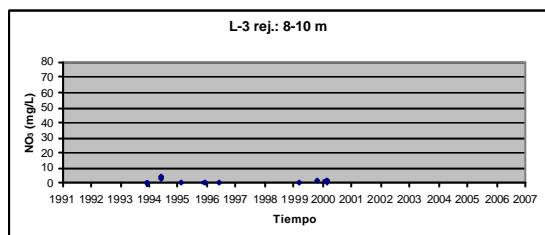
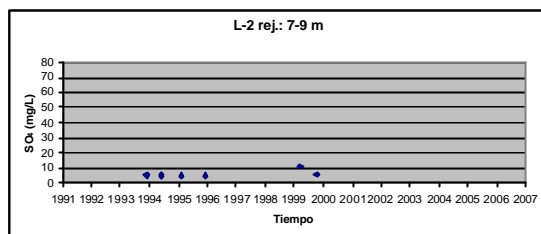
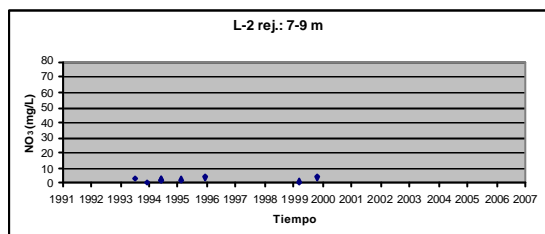
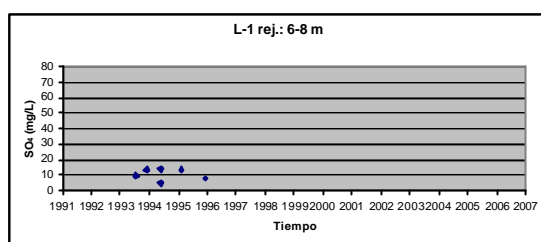
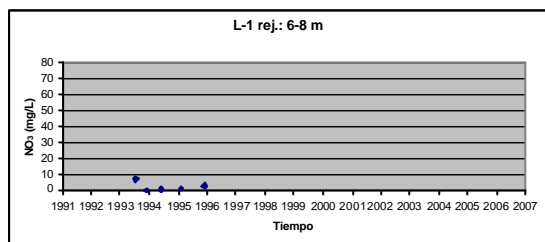


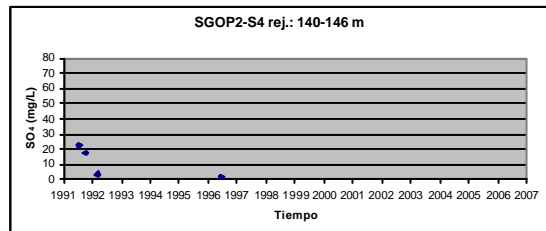
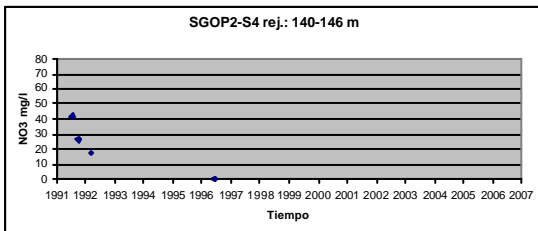
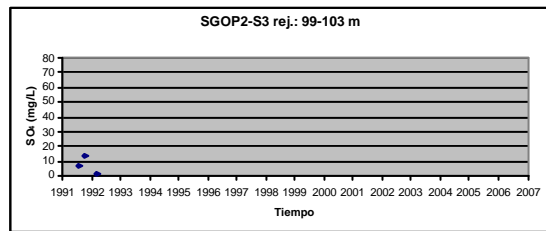
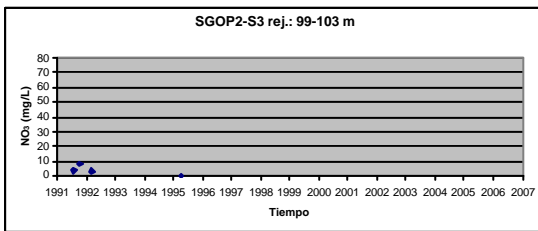
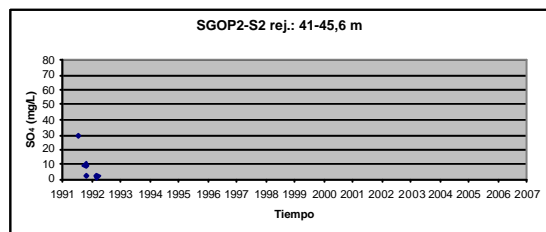
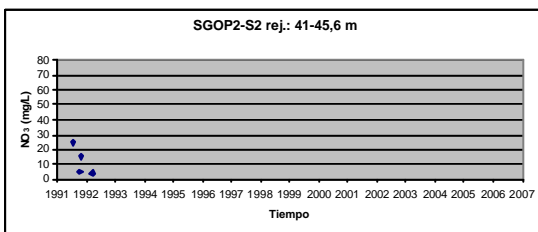
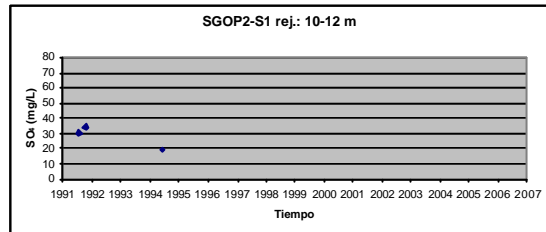
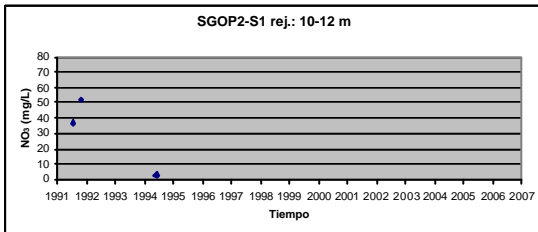
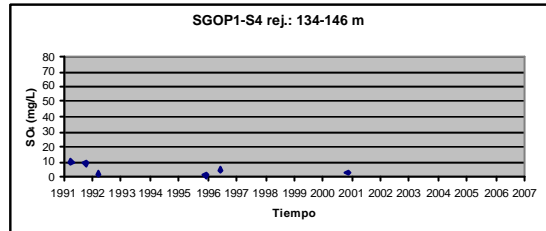
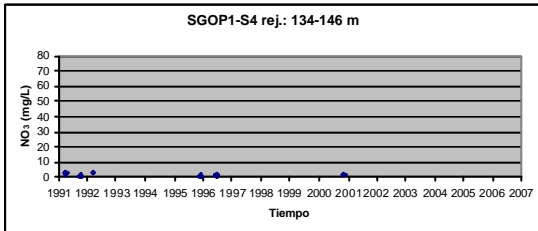
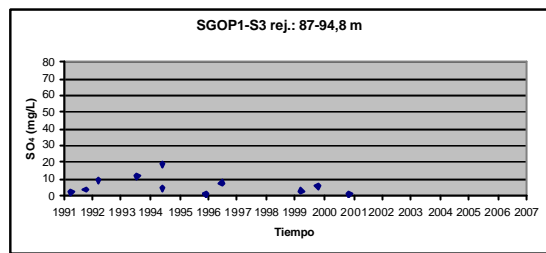
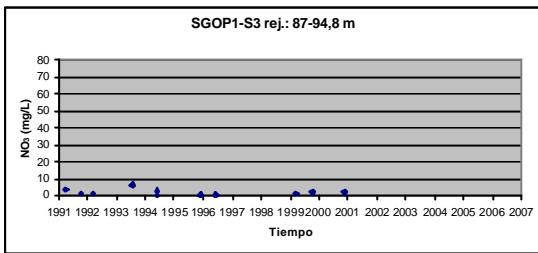
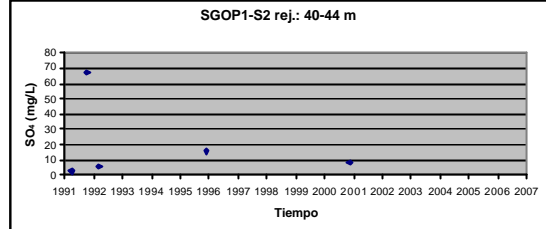
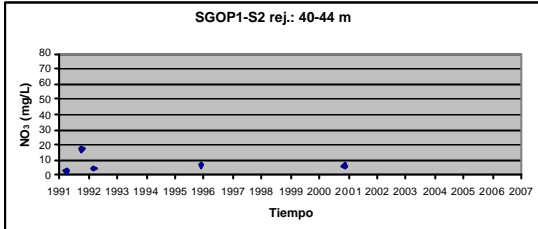
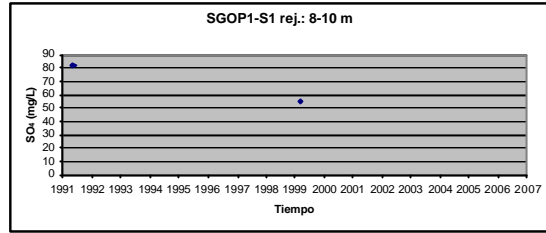
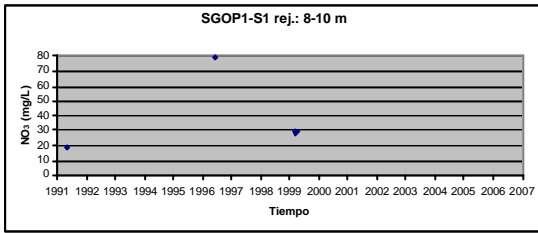


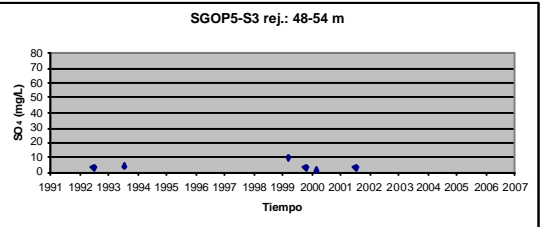
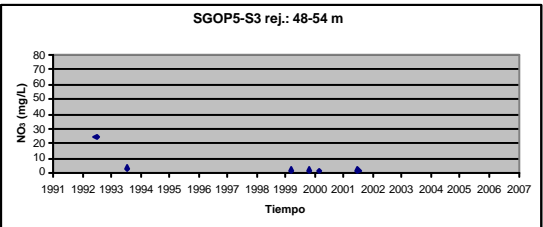
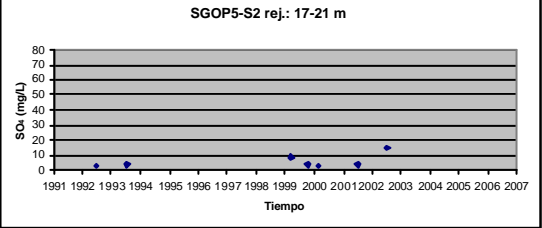
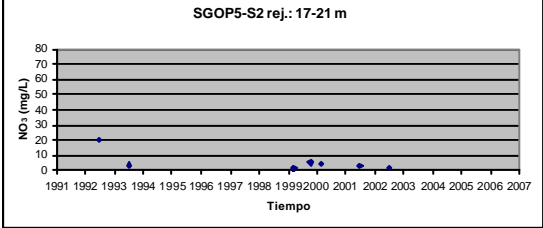
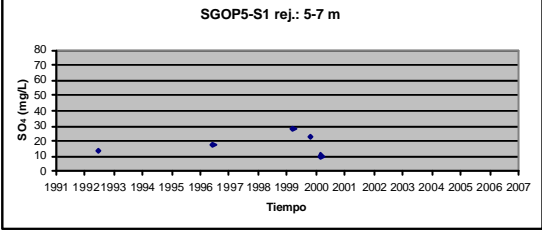
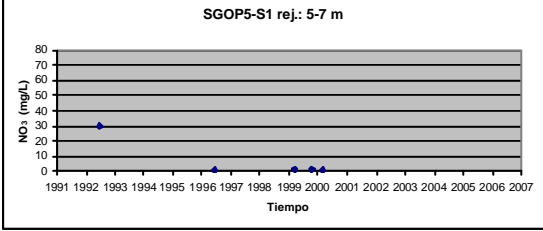
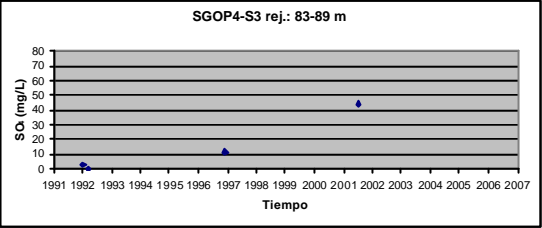
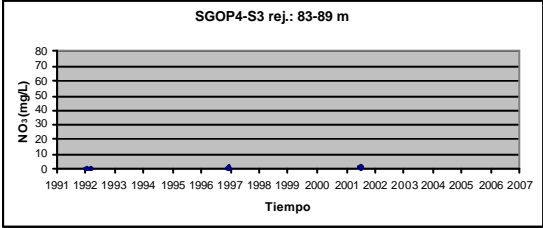
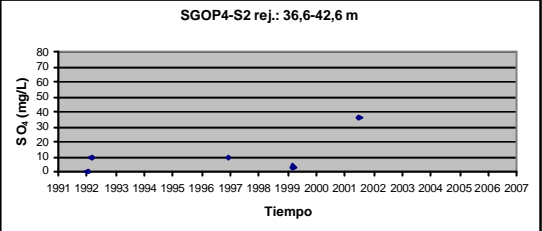
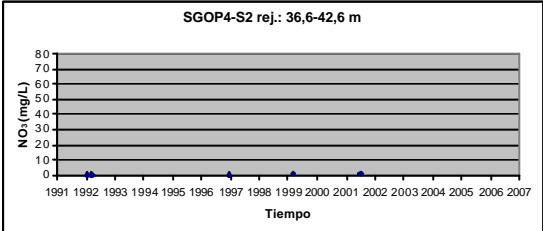
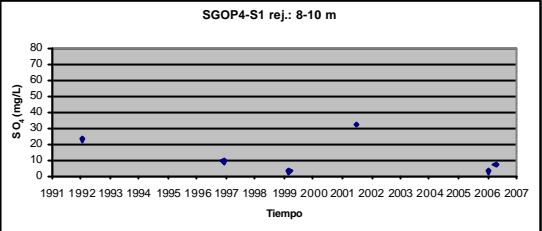
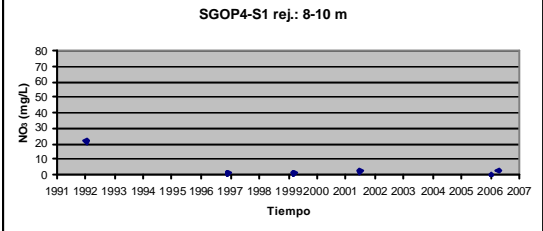
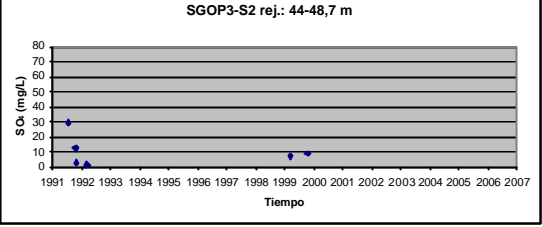
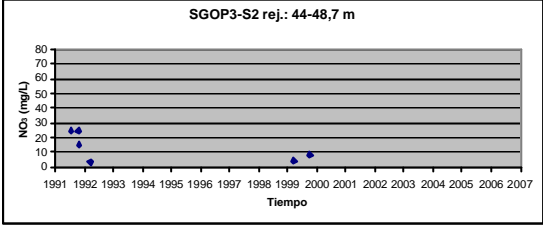
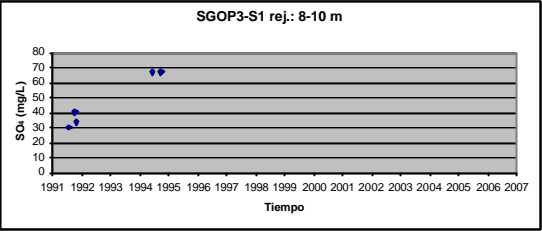
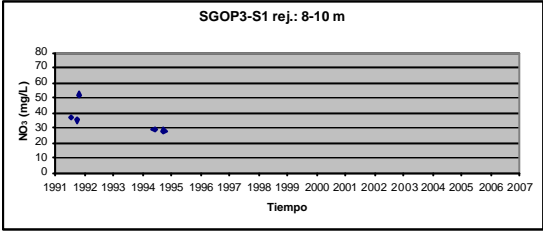


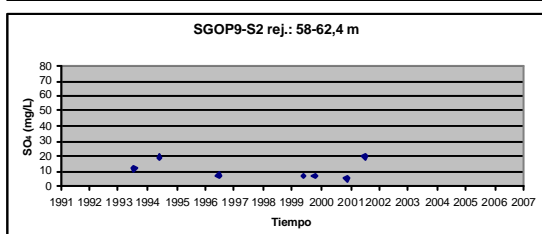
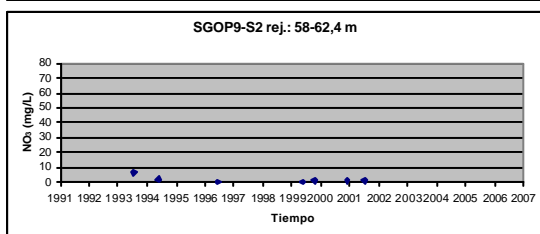
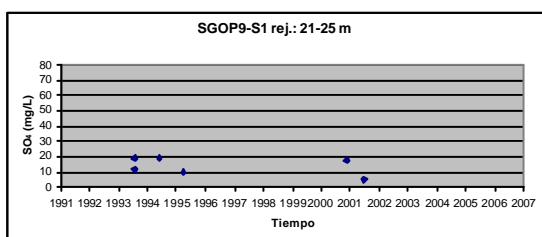
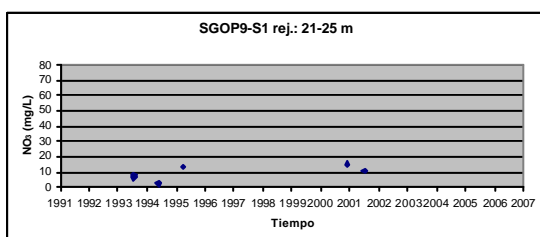
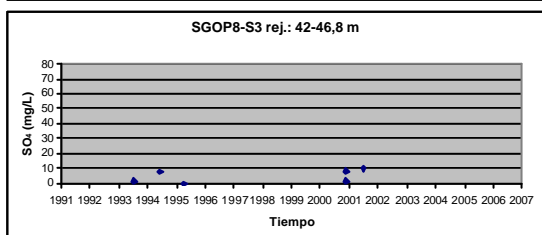
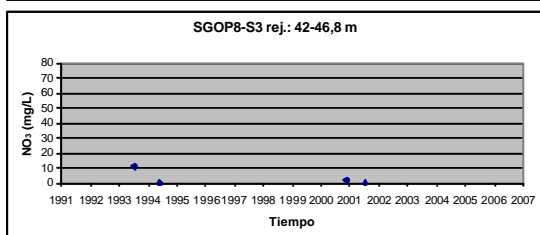
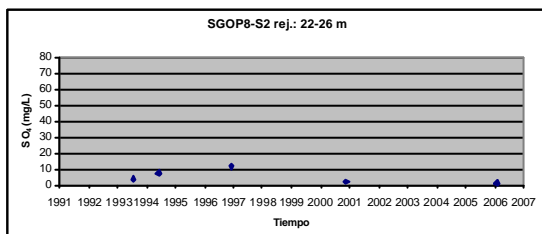
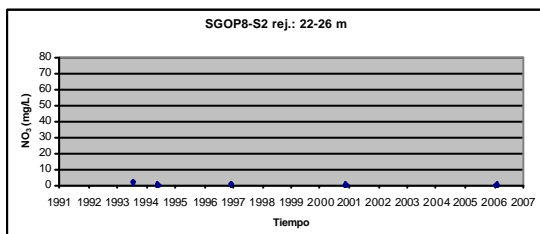
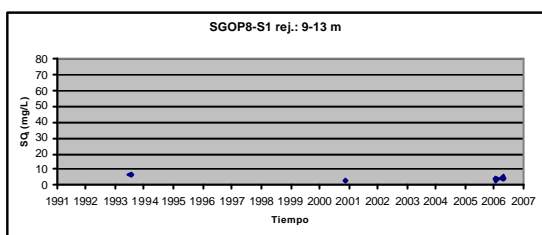
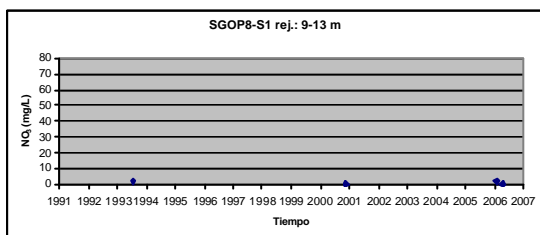
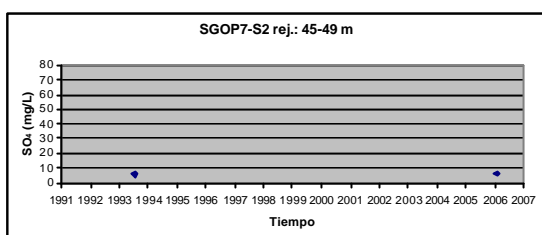
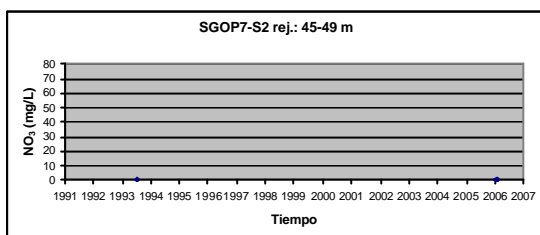
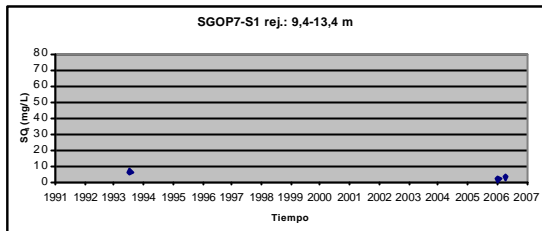
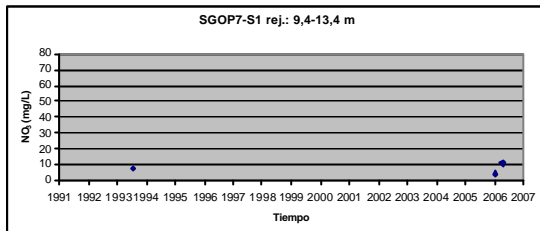
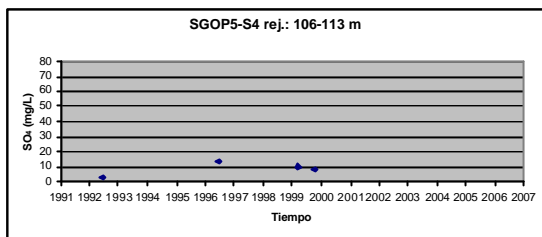
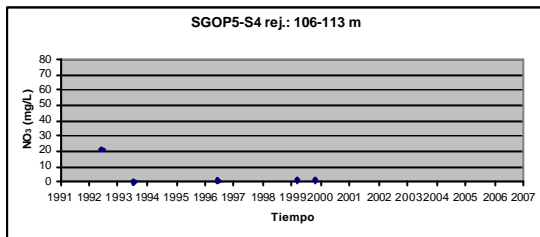


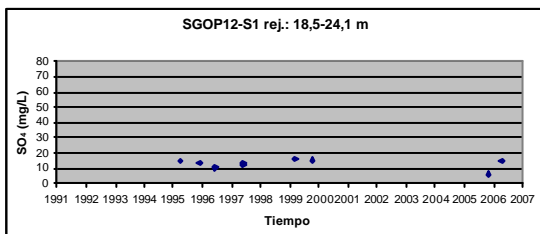
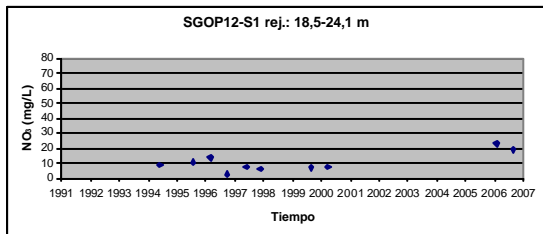
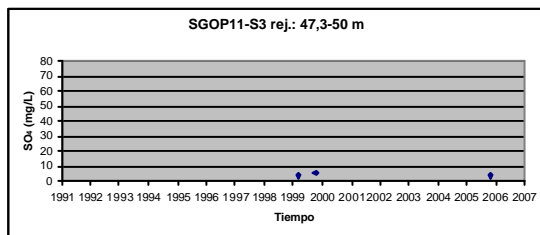
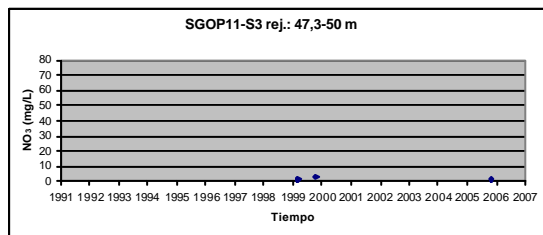
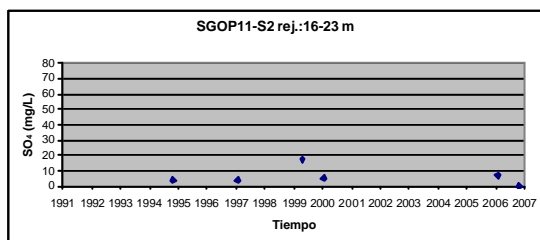
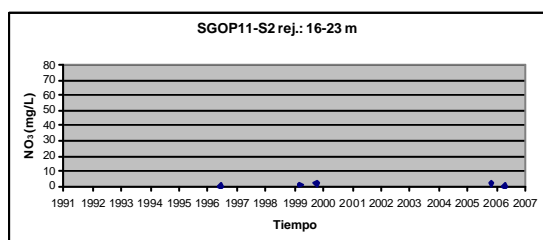
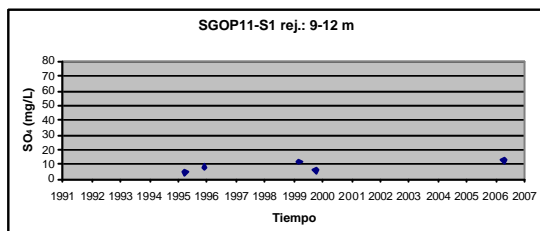
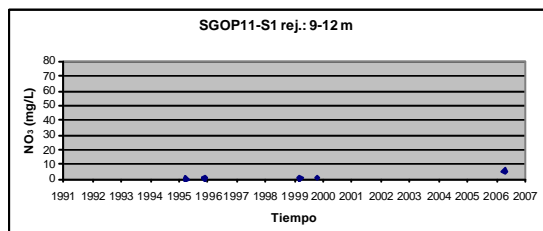
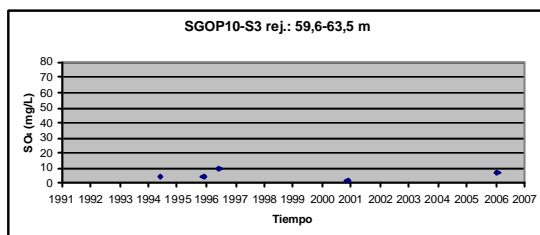
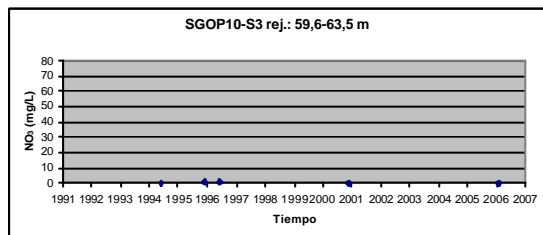
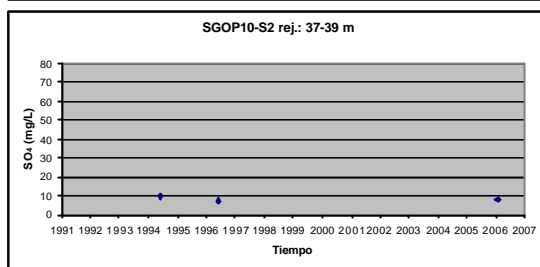
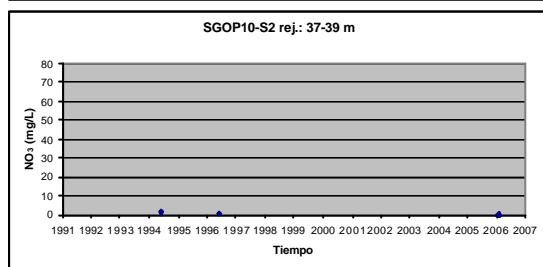
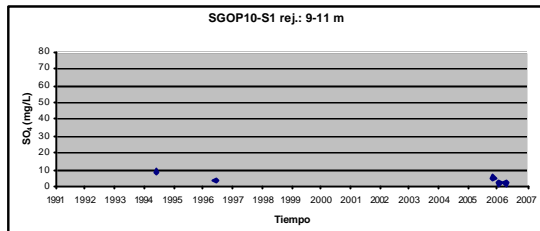
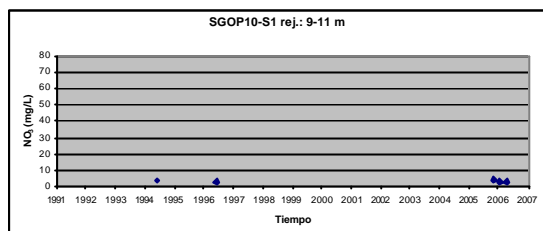
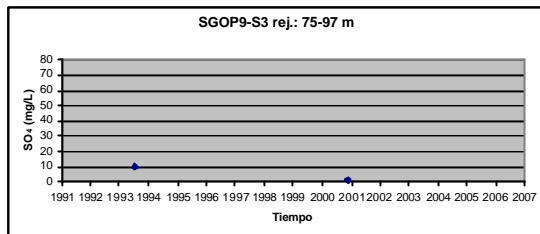
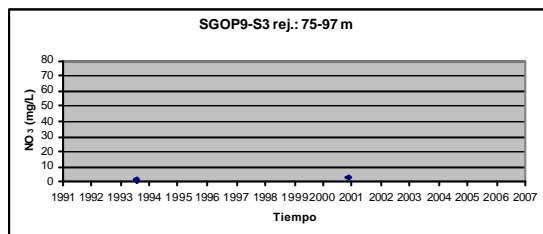


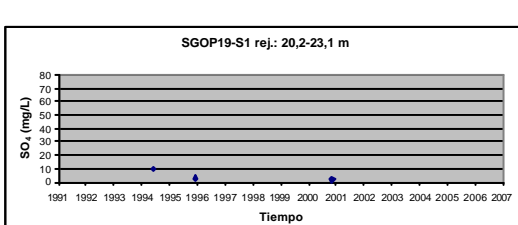
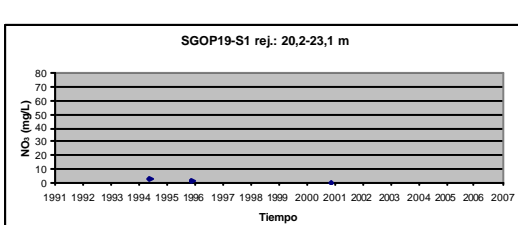
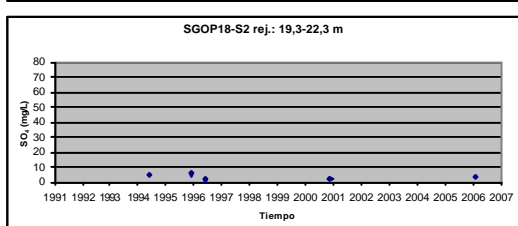
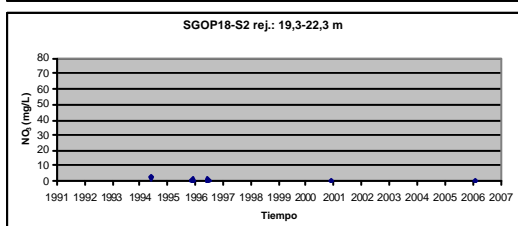
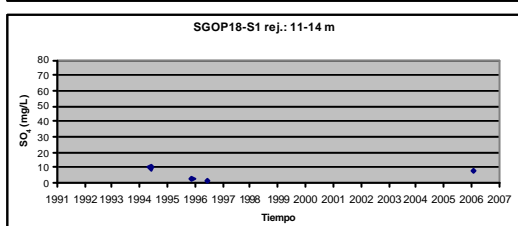
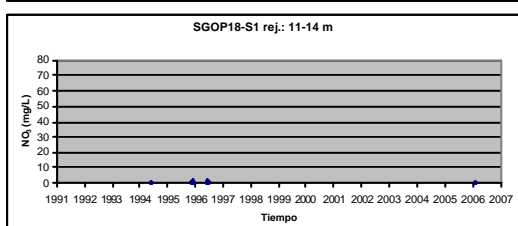
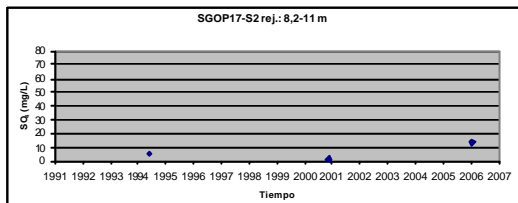
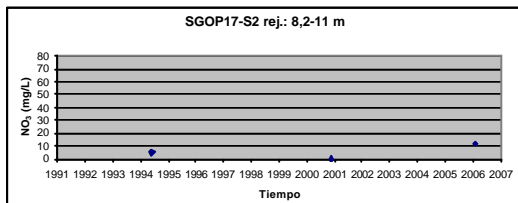
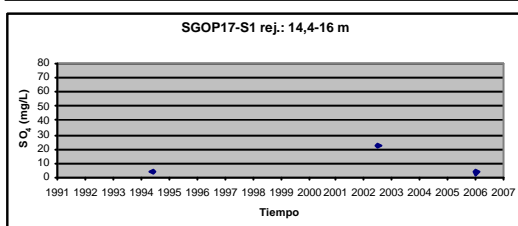
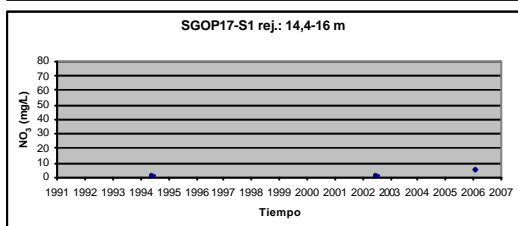
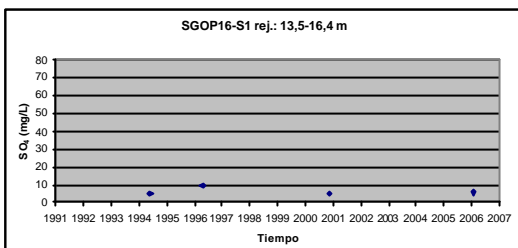
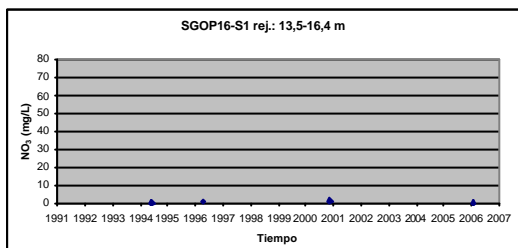
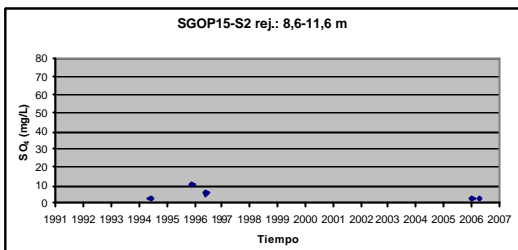
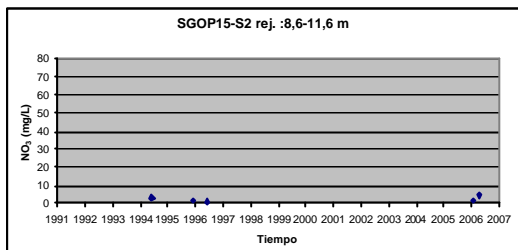
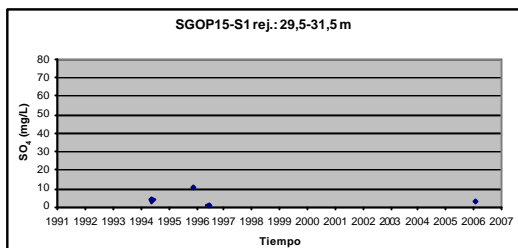
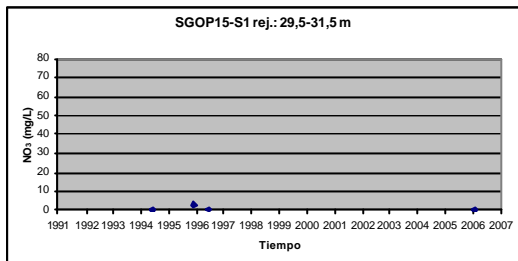


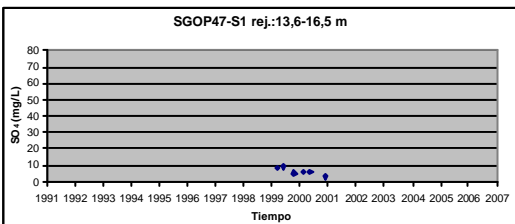
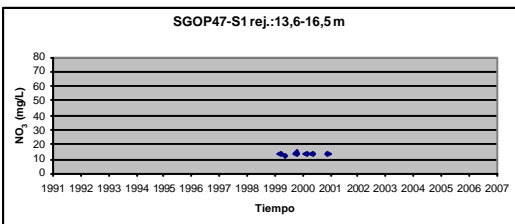
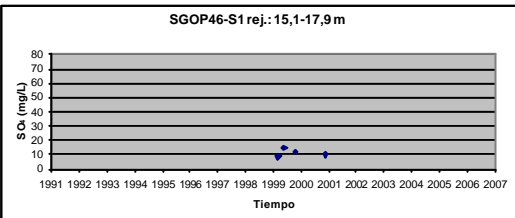
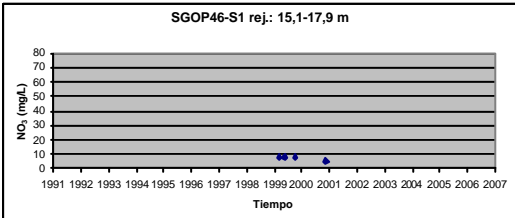
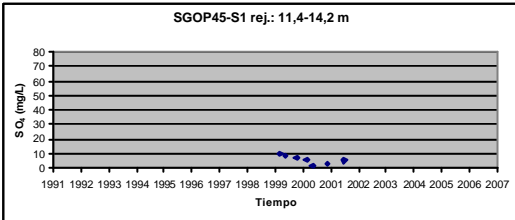
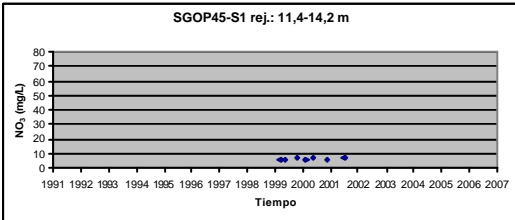
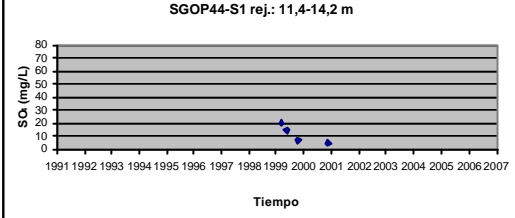
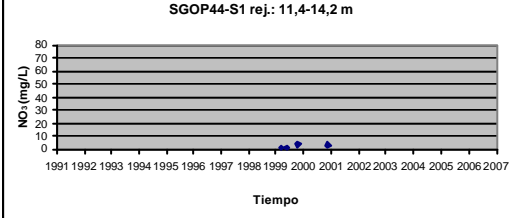
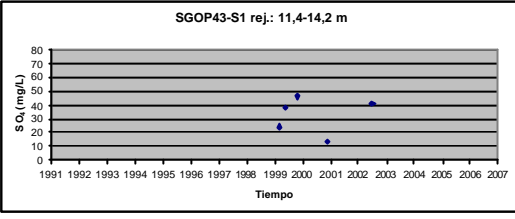
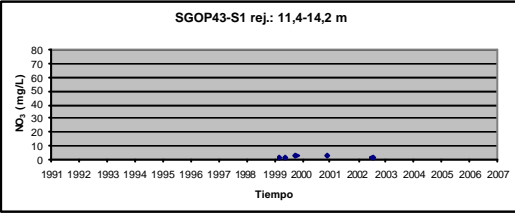
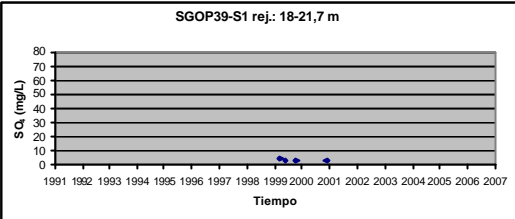
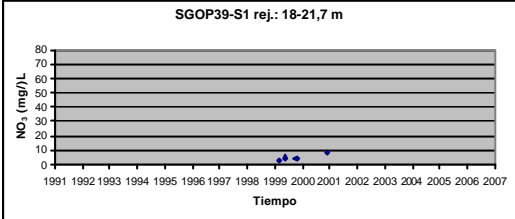
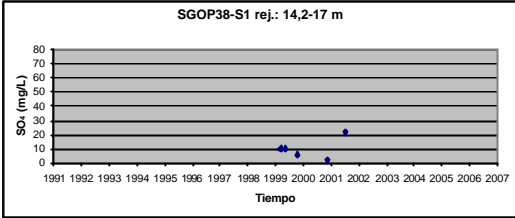
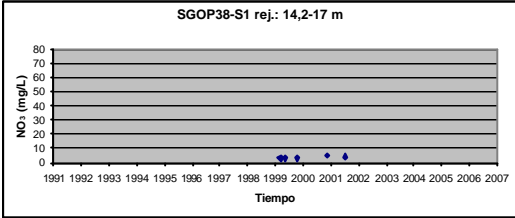
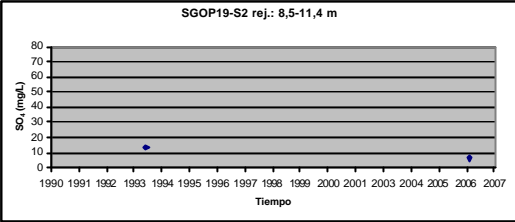
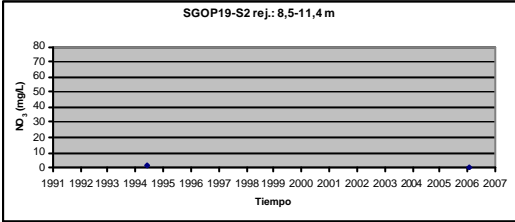


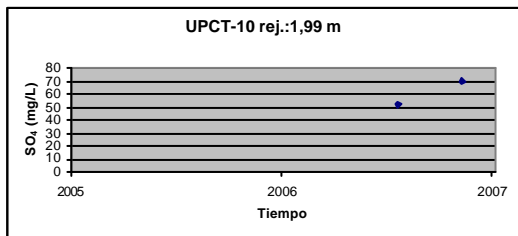
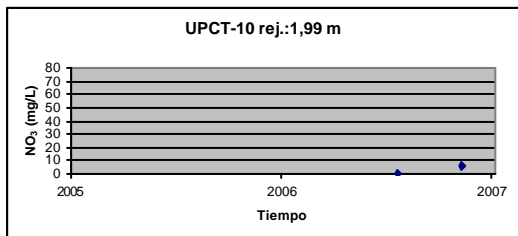
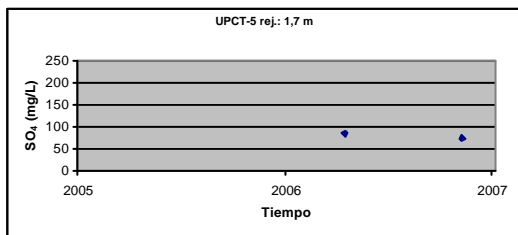
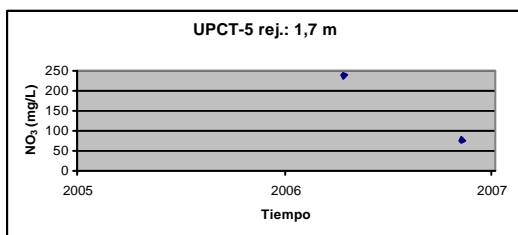
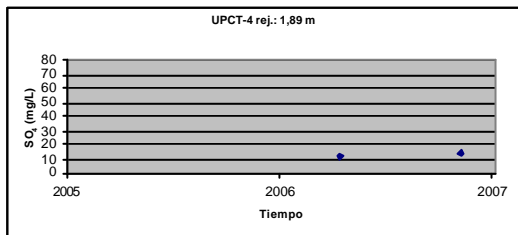
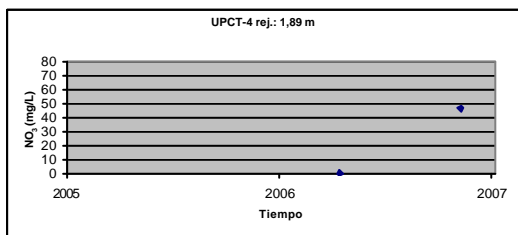
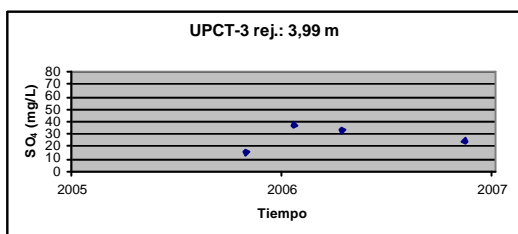
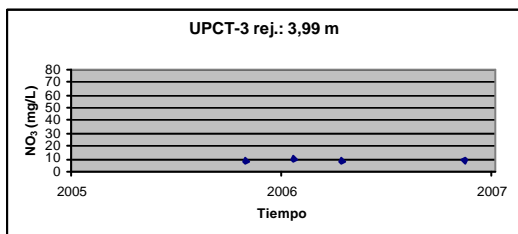
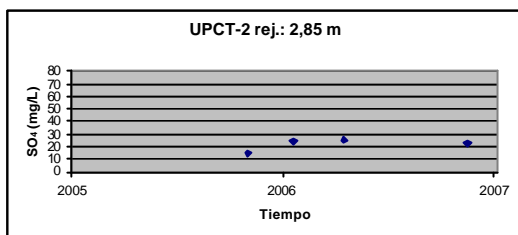
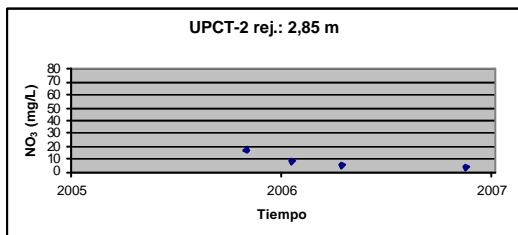
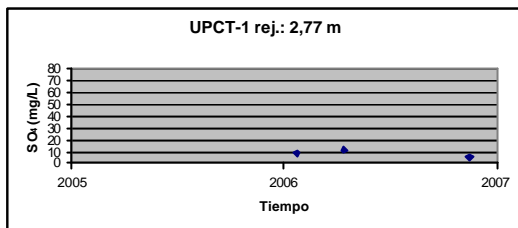
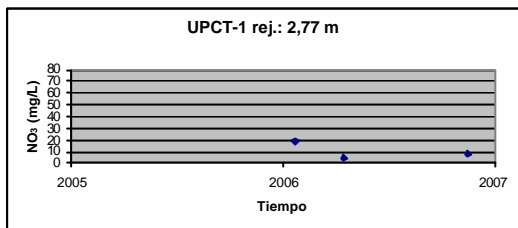
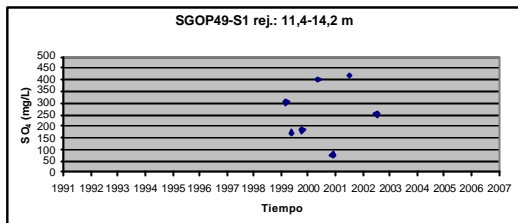
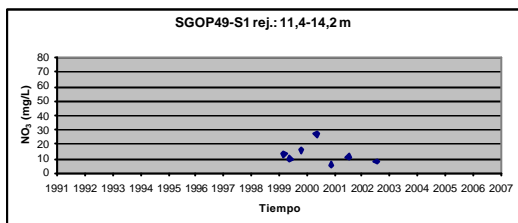
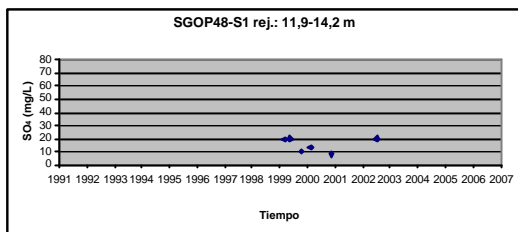
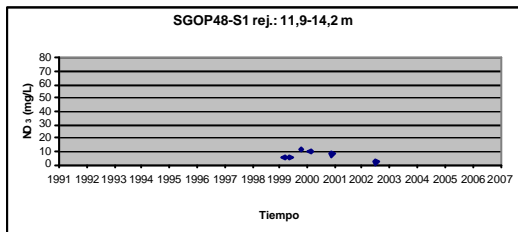


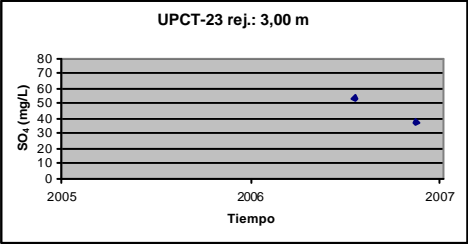
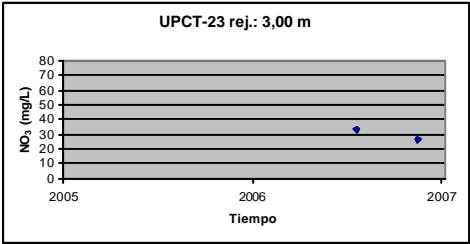
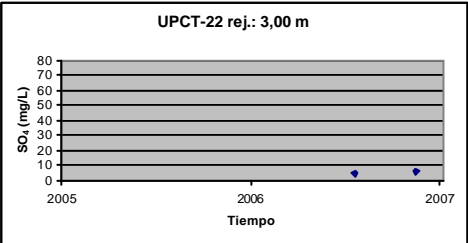
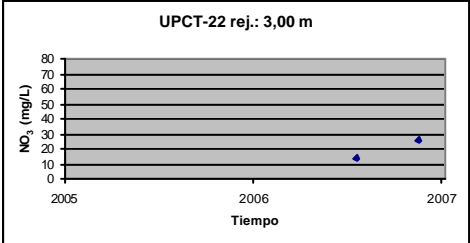
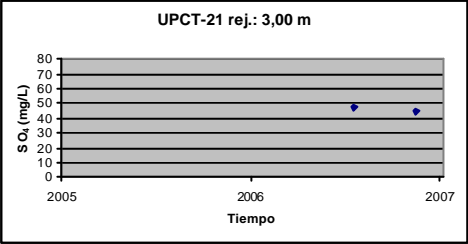
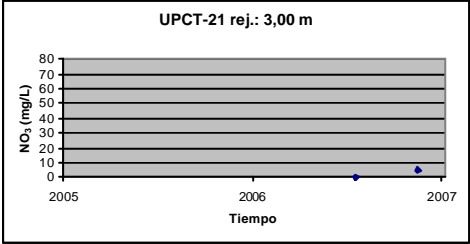
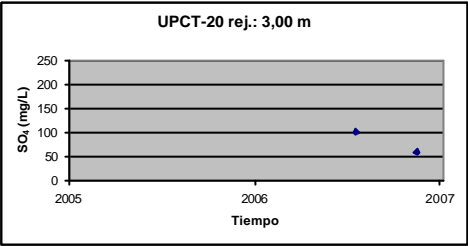
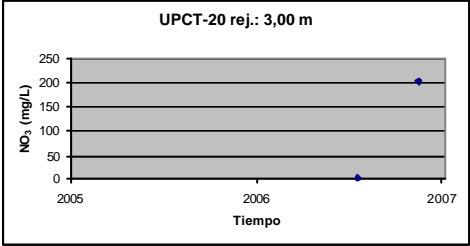
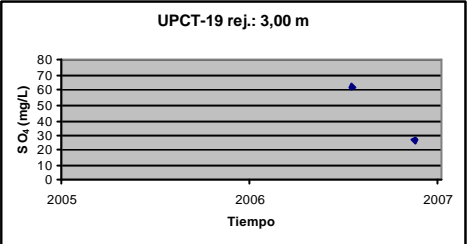
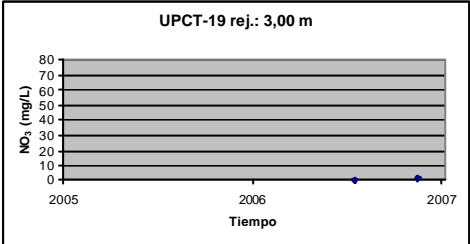
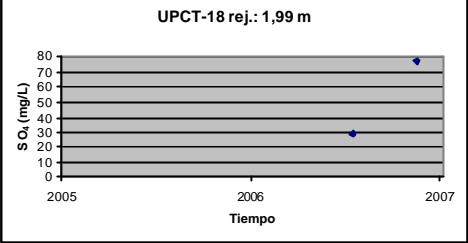
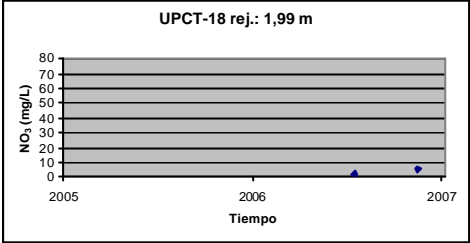
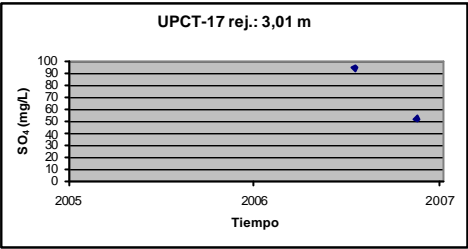
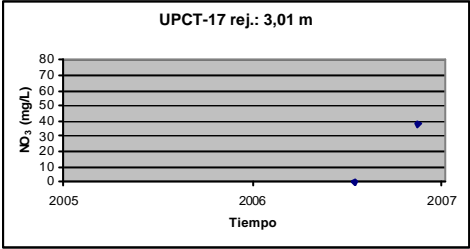


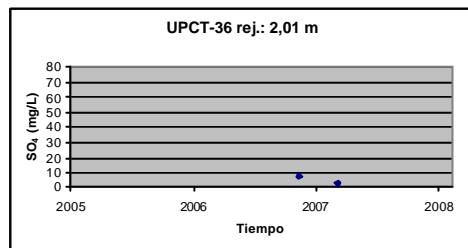
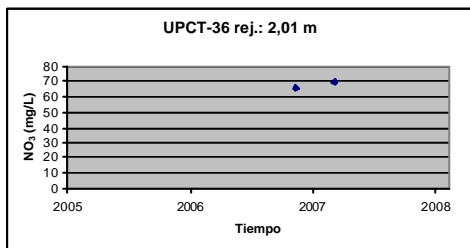
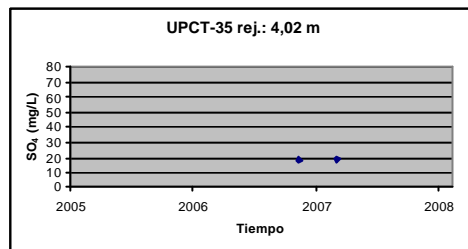
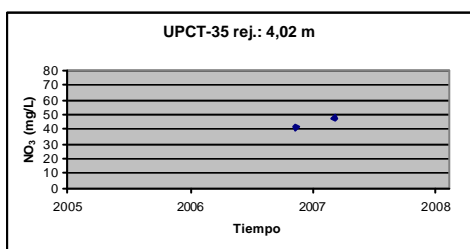
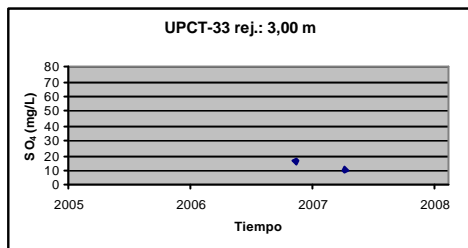
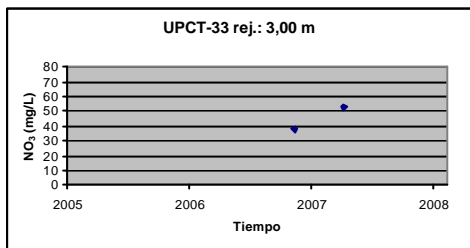
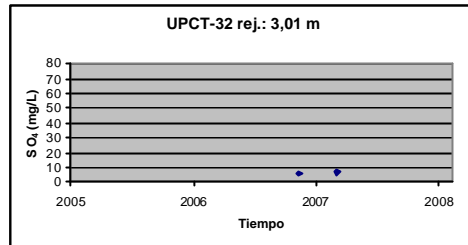
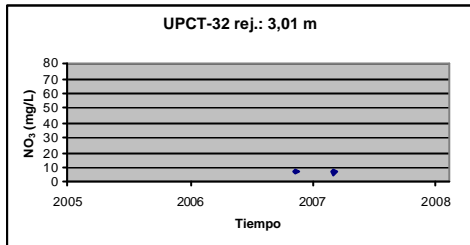
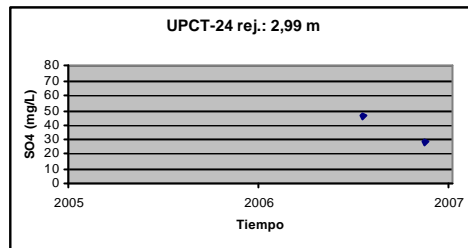
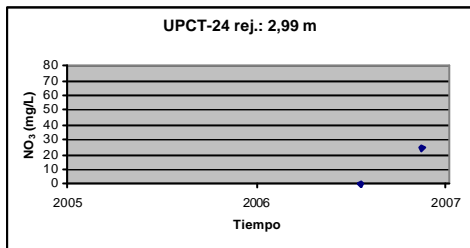




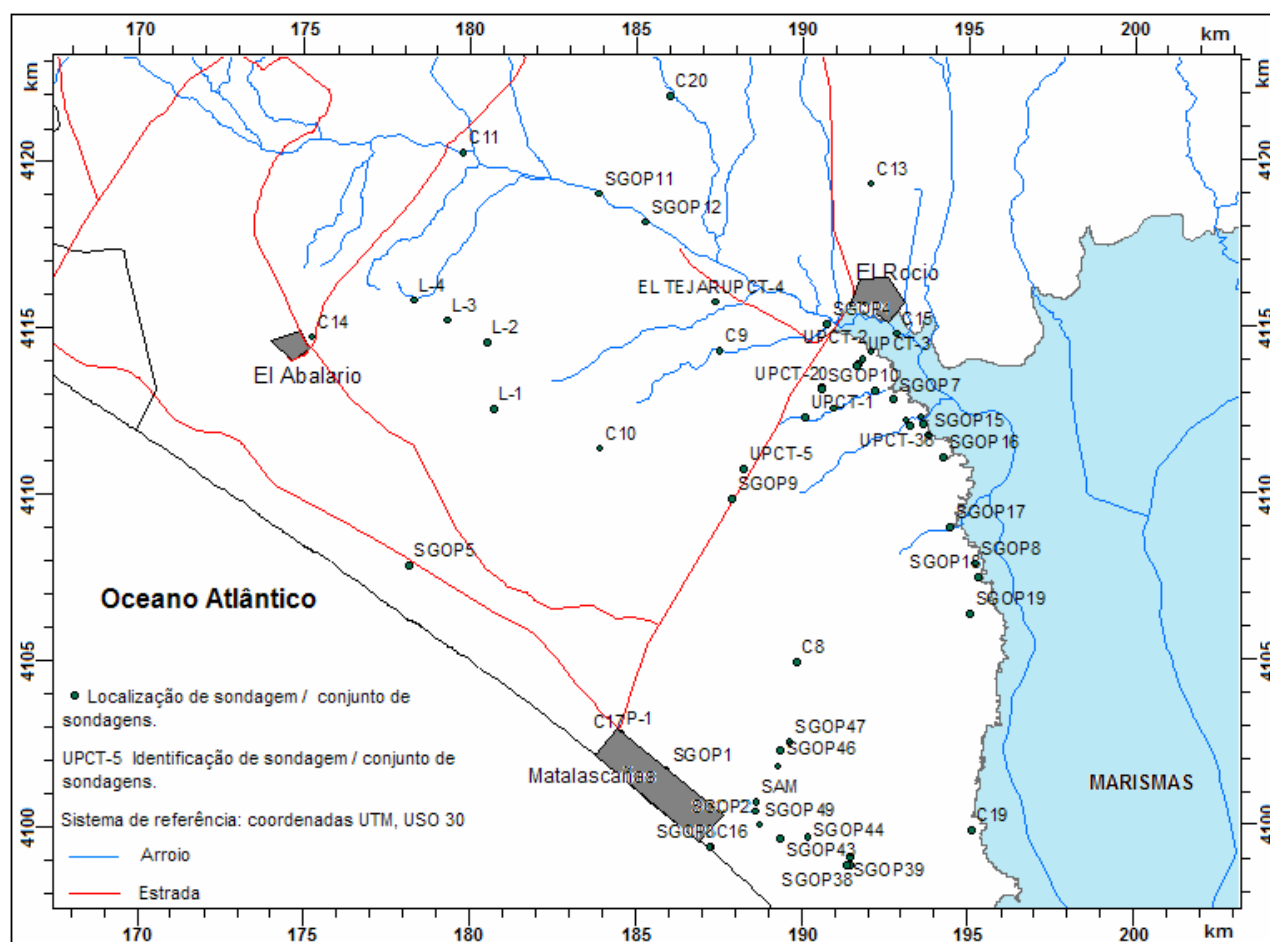








ANEXO III
MAPAS DE NITRATOS EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE



A concentração dos nitratos de seguida representada é exprimida em mg/L.

